



TUGAS AKHIR – MO141326

**DESAIN *WAVE ENERGY CONVERTER* BERKONFIGURASI
ARTICULATED TOWER DENGAN VARIASI UKURAN SILINDER**

DANIL TRI PUTRA

NRP. 4313100095

Dosen Pembimbing :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

Departemen Teknik Kelautan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2017



FINAL PROJECT – MO141326

**WAVE ENERGY CONVERTER DESIGN CONFIGURED
ARTICULATED TOWER WITH VARIATION OF CYLINDER SIZE**

DANIL TRI PUTRA

NRP. 4313100095

Supervisors :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

Ocean Engineering Department

Faculty of Marine Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya

2017

**DESAIN *WAVE ENERGY CONVERTER* BERKONFIGURASI *ARTICULATED*
TOWER DENGAN VARIASI UKURAN SILINDER**

TUGAS AKHIR

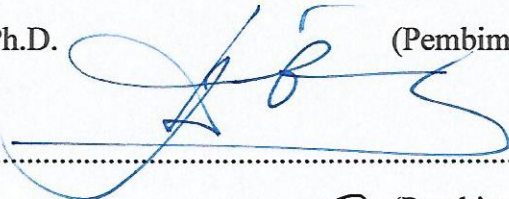
Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan Institut
Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

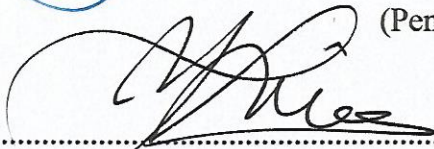
DANIL TRI PUTRA NRP. 4313100095

Disetujui Oleh :

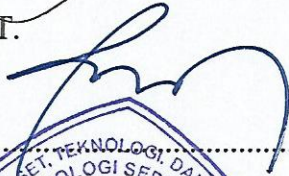
1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 1)



2. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D. (Pembimbing 2)



3. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. (Penguji 1)



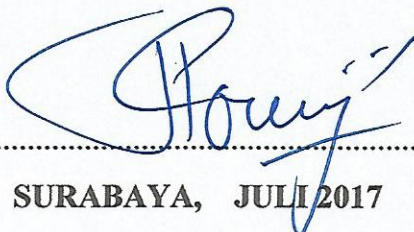
4. Yoyok Setyo, S.T., M.T., Ph.D. (Penguji 2)



5. Ir. Mas Murtedjo, M.Eng. (Penguji 3)



6. Ir. Murjidto, M.Sc.Eng. (Penguji 4)



SURABAYA, JULI 2017

DESAIN WAVE ENERGY CONVERTER BERKONFIGURASI ARTICULATED TOWER DENGAN VARIASI UKURAN SILINDER

Nama Mahasiswa : Danil Tri Putra
NRP : 4313100095
Departemen : Teknik Kelautan, FTK-ITS
Dosen Pembimbing : 1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
2. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Kebutuhan energi semakin meningkat dari waktu ke waktu. Hal ini beriringan dengan meningkatnya jumlah penduduk yang ada. Meningkatnya kebutuhan energi akan meningkatkan eksploitasi energi yang ada. Padahal suatu saat energi seperti minyak, gas, dan batubara suatu saat akan habis. Untuk mengatasi hal tersebut bisa dilakukan dengan cara menggunakan energi alternatif.

Ada banyak jenis-jenis energi alternatif. Indonesia mempunyai potensi besar untuk memanfaatkan energi gelombang sebagai energi alternatif karena Indonesia memiliki garis pantai nomor dua terpanjang di dunia dan sebagian besar wilayah Indonesia merupakan lautan. Cara memanfaatkan gelombang laut sebagai energi alternatif yaitu dengan membuat *wave energy converter*.

Ada banyak desain *wave energy converter* yang sudah ada. Salah satu desain *wave energy converter* yaitu dengan memanfaatkan gaya pitching sebagai penggerakan piston yang memompa air untuk menggerakan turbin. Kecepatan air yang dipompa piston penting karena akan mempengaruhi besar energi yang akan dihasilkan oleh turbin generator. Kecepatan air tergantung dari kekuatan pompa dan kekuatan pompa dipengaruhi oleh gerakan pitching *wave energy converter*.

Respon Gerak struktur bervariasi tergantung dari ukuran dan kedalaman tempat struktur akan diletakkan. Respon terbesar yang terjadi pada variasi diameter 2m tinggi buoyancy chamber 3,5m dan tebal buoyancy chamber 10mm yaitu 58,97 %/m untuk kedalaman 10m, 31,52 %/m untuk kedalaman 15m, dan 9,14 %/m untuk kedalaman 20m.

Untuk variasi diameter 3m tinggi bouyancy chamber 4,5m dan tebal bouyancy chamber 25mm yaitu 53,41 °/m untuk kedalaman 10m, 50,87 °/m untuk kedalaman 15m, dan 20,7 °/m untuk kedalaman 20m. Diameter 4m tinggi bouyancy chamber 5,5m dan tebal bouyancy chamber 30mm yaitu 50,6°/m untuk kedalaman 10m, 54,17 °/m untuk kedalaman 15m, dan 25,31 °/m untuk kedalaman 20m.

Simpangan terbesar terjadi pada variasi diameter 4m pada kedalaman 10m yaitu sebesar 2,48m. kecepatan outlet air terbesar terjadi pada variasi $D=4m$ $H=4,5m$ $t=25mm$ $d=10$ untuk v_x maks 247,62m/s dan v_x rata – rata 142,13m/s sedangkan kecepatan outlet terendah terjadi pada variasi $D=2m$ $H=3,5m$ $t=10mm$ $d=10m$ untuk v_x maks 130,17m/s dan v_x rata – rata 74,71m/s. Perhitungan kecepatan air yang dilakukan belum mempertimbangkan loses yang terjadi selama air bergerak dari dalam piston menuju keluar.

WAVE ENERGY CONVERTER DESIGN CONFIGURED ARTICULATED TOWER WITH VARIATION OF CYLINDER SIZE

Name of Student : Danil Tri Putra
REG : 4313100095
Departement : Teknik Kelautan, FTK-ITS
Supervisor : 1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
2. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

Energy requirements are increasing from time to time. This problem is in line with the increasing number of population. Increased energy demand will also increase the exploitation of existing energy. Whereas someday the energy such as oil, gas, and coal will run out. To overcome this problem can be done by using alternative energy.

There are many types of alternative energy. Indonesia has great potential to utilize wave energy as an alternative energy because Indonesia has the second longest coastline in the world and most of Indonesia's teritority is ocean. The way to utilize sea waves as alternative energy is by making wave energy converter.

There are many designs of wave energy converter. One of the wave energy converter design is by utilizing the pitching force as a piston movement that pumps water to move the turbine. The velocity of pumped water by the piston is important because it affects the amount of energy generated by the generator turbine. The water velocity depends on the strength of the pump and the pump strength is affected by the pitching movement of the wave energy converter.

From the results of the analysis, it was found that the response of WEC structure depends on the depth and size of the WEC. The greatest response occurring in the 2m diameter variation, the height of the bouyancy chamber is 3.5m and the thickness of the bouyancy chamber at 10mm are $58,97^{\circ} / m$ for the depth of 10m, $31,52^{\circ} / m$ for the depth of 15m, and $9,14^{\circ} / m$ for the depth of 20m. For 3m diameter variation, when bouyancy chamber height is 4.5m and bouyancy chamber thickness is

25mm are $53,41^{\circ} / \text{m}$ for the depth of 10m, $50,87^{\circ} / \text{m}$ for the depth of 15m and $20,7^{\circ} / \text{m}$ for the depth of 20m. At 4m diameter, bouyancy chamber height is 5.5m and the thickness of bouyancy chamber is 30mm, are $50,6^{\circ} / \text{m}$ for the depth of 10m, $54,17^{\circ} / \text{m}$ for the depth of 15m, and $25,31^{\circ} / \text{m}$ for the depth of 20m.

The biggest deviation occurs in variations in diameter of 4m at a depth of 10m that is 2,48m. The highest water velocity coming out from piston in variations $D=4\text{m}$ $H=5,5\text{m}$ $t=25\text{mm}$ $d=10\text{m}$ for max v_x 247,62m/s and average v_x 142, 13m/s. The lowest water velocity coming out from piston in variation $D=2\text{m}$ $H=2,5\text{m}$ $t=10\text{mm}$ $d=20\text{m}$ for max v_x 130,17m/s and average v_x 74,71m/s. Calculation of water velocity is not consider the loses that happen in piston.

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum.wr.wb

Puji syukur kehadiran Allah SWT, berkat limpahan rahmat dan karuniaNya Tugas Akhir ini bisa diselesaikan dengan judul “Desain *Wave Energy Converter* Berkonfigurasi *Articulated Tower* Dengan Variasi Ukuran Silinder”

Tugas Akhir ini merupakan persyaratan untuk menyelesaikan program studi sarjana di Departemen Teknik Kelautan FTK-ITS.

Penulis mengharapkan kritik dan saran untuk membuat penelitian ini lebih bermanfaat dan lebih sempurna lagi. Sehingga penelitian ini akan bermanfaat untuk perkembangan teknologi kedepannya, khususnya untuk bidang perkembangan pembangkit listrik bertenaga gelombang laut.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya pelaksanaan Tugas Akhir ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah membantu dan senantiasa mendukung, baik secara langsung ataupun tidak langsung. Penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Allah SWT karena berkat limpahan rahmat dan karunia-Nya Tugas Akhir ini dapat diselesaikan
2. Orang tua penulis yang senantiasa selalu memberikan dukungan dalam segala bentuk dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
3. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D., sebagai dosen pembimbing pertama yang selalu meluangkan waktunya untuk membagi ilmu, mengarahkan, dan memberikan masukan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
4. Bapak Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D., sebagai dosen pembimbing kedua yang selalu meluangkan waktunya untuk membagi ilmu, mengarahkan, dan memberikan masukan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
5. Teman – teman Teknik Kelautan FTK-ITS angkatan 2013 (Valtameri) atas kebersamaan selama menjalani kehidupan perkuliahan yang kurang lebih selama 4 tahun di Teknik Kelautan FTK-ITS.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR.....	viii
UCAPAN TERIMA KASIH	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR NOTASI	xv
LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. LATAR BELAKANG.....	1
1.2. PERUMUSAN MASALAH.....	2
1.3. TUJUAN	2
1.4. MANFAAT	2
1.5. BATASAN MASALAH	2
1.6. SISTEMATIKA PENULISAN	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.2. DASAR TEORI.....	6
2.2.1. Gelombang Laut	6
2.2.2. Gaya Gelombang Morrison	12
2.2.3. <i>Articulated Tower</i>	15
2.2.4. <i>Response Amplitude Operator (RAO)</i>	20
2.2.5. Teknik Konversi Energi Laut Menjadi Energi Listrik.....	22
2.2.6. Sistem Penggerak Piston	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1. <i>FLOWCHART</i> PENELITIAN	25
3.2. PENJELASAN DIAGRAM ALIR.....	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29

4.1. MENENTUKAN UKURAN SILINDER <i>BOUYANCY CHAMBER</i> (BC) DAN <i>LEG</i> WEC	29
4.2. MENGHITUNG RESPON WEC SECARA ANALITIK.....	30
4.3. ANALISA RAO DENGAN <i>SOFTWARE</i> ANSYS AQWA	34
4.4. MENGHITUNG DEBIT AIR DALAM SILINDER PISTON	40
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	43
5.1. KESIMPULAN	43
5.2. SARAN	43
DAFTAR PUSTAKA.....	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Gelombang Laut Ideal	7
Gambar 2.2 Spektrum Energi Gelombang dengan Variasi Kecepatan	8
Gambar 2.3 Catatan Gelombang	8
Gambar 2.4 Partikel Gelombang pada Laut Dalam.....	10
Gambar 2.5 Partikel Gelombang Laut Dangkal dan Laut Transisi	10
Gambar 2.6 Gerakan Partikel Gelombang Perairan Dalam yang Besar.....	11
Gambar 2.7 Daerah Validitas Teori Gelombang	11
Gambar 2.8 Silinder Terpancang Tegak Pada Medan Propagasi Gelombang	13
Gambar 2.9 Konfigurasi Dasar <i>Articulated Tower</i>	15
Gambar 2.10 Gerakan <i>Articulated Tower</i> Ketika Terkena Gaya Gelombang.....	16
Gambar 2.11 Gerakan <i>Articulated Tower</i>	16
Gambar 2.12 Persamaan Untuk Menghitung Momen Inersia	18
Gambar 2.13 Bentuk Umum Grafik RAO.....	21
Gambar 2.14 Pemanfaatan Energi Kinetik dalam Gelombang Laut	22
Gambar 2.15 Mekanisme kerja piston.....	23
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Pengerjaan Tugas Akhir.....	25
Gambar 3.3 Desain Awal WEC Diameter Piston Konstan	27
Gambar 3.4 Desain Awal WEC Diameter Ujung Piston Mengecil.....	27
Gambar 4.1 Grafik RAO pitch WEC material baja ukuran $D=2\text{m}$ $H=3,5\text{m}$ $t=10\text{mm}$ di 3 variasi kedalaman laut	32
Gambar 4.2 Grafik RAO pitch WEC material baja ukuran $D=3\text{m}$ $H=4,5\text{m}$ $t=25\text{mm}$ di 3 variasi kedalaman laut	32
Gambar 4.3 Grafik RAO pitch WEC material baja ukuran $D=4\text{m}$ $H=5,5\text{m}$ $t=30\text{mm}$ di 3 variasi kedalaman laut	33
Gambar 4.4 Grafik RAO pitch WEC ukuran $D=2\text{m}$ $H=3,5\text{m}$ $t=10\text{mm}$ material fiber di 3 variasi kedalaman laut	34
Gambar 4.5 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran $D=2\text{m}$ $H=3,5\text{m}$ $t=10\text{mm}$ kedalaman 10m.....	35

Gambar 4.6 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran D=2m H=3,5m t=10mm kedalaman 15m.....	36
Gambar 4.7 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran D=2m H=3,5m t=10mm kedalaman 20m.....	36
Gambar 4.8 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran D=3m H=4,5m t=25mm kedalaman 10m.....	37
Gambar 4.9 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran D=3m H=4,5m t=25mm kedalaman 15m.....	37
Gambar 4.10 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran D=3m H=4,5m t=25mm kedalaman 20m.....	38
Gambar 4.11 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran D=4m H=5,5m t=30mm kedalaman 10m.....	38
Gambar 4.12 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran D=4m H=5,5m t=30mm kedalaman 15m.....	39
Gambar 4.13 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran D=4m H=5,5m t=30mm kedalaman 20m.....	39

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Hubungan Kecepatan Angin dan Tinggi Gelombang Skala Beaufort.....	9
Tabel 2.2 Lanjutan Hubungan Kecepatan Angin dan Tinggi Gelombang Skala Beaufort ...	9
Tabel 4.1 Kekakuan WEC	30
Tabel 4.2 Momen Inersia Total WEC	31
Tabel 4.3 Frekuensi Natural WEC	31
Tabel 4.4 Besar Ukuran Tabung Piston.....	40
Tabel 4.5 Kecepatan laju air	41

DAFTAR NOTASI

C_D	Koefisien Drag
c_f	Damping ratio
C_m	Koefisien Massa Tambah
C_θ	Damping
d	Kedalaman Laut (m)
F_D	Gaya Drag
F_I	Gaya Inersia
F_P	Gaya Tekanan
F_T	Gaya Morrison
g	Gravitasi Bumi (m/s^2)
H	Tinggi Gelombang (m)
I_θ	Momen Inersia Massa ($kg.m^2$)
$I_{\theta A}$	Momen Inersia Massa Tambah ($kg.m^2$)
KB	Titik Berat Buoyancy (m)
KG	Titik Berat Struktur (m)
K_θ	Kekakuan (N/m)
L	Panjang Bangunan (m)
l_n	Panjang Bagian Silinder (m)
m_n	Massa Bagian Silinder (m)
$M_{R\theta}$	Momen Pengembali
$M_{\theta 0}$	Momen Akibat Gaya Eksitasi
Q	Debit Air (m^3/s)
R_n	Jari – jari Silinder (m)
t	Periode Gelombang (s)
u	Kecepatan Partikel Air
\dot{u}	Percepatan Partikel Air
v_x	Kecepatan Air pada Outlet Piston (m/s)

W	Massa Total Struktur (kg)
x	Simpangan Struktur (m)
\dot{x}	Kecepatan Gerak Struktur (m/s)
z	Posisi kecepatan yang akan dihitung (m)
ω	Frekuensi Gelombang (rad/s)
ω_n	Frekuensi Natural (rad/s)
ζ	Amplitudo Gelombang (m)
ζ_{k0}	Amplitudo Struktur Gerakan Translasi (m)
ρ	Densitas Air Laut (kg/m ³)
∇	Volume Struktur Tercelup Air (m ³)
λ	Panjang Gelombang (m)
θ	Kemiringan Struktur (rad atau deg)
θ_0	Respon Articulated Tower (rad atau deg)
$\dot{\theta}$	Kecepatan Rotasi Struktur (rad/s)

LAMPIRAN

LAMPIRAN A

LAMPIRAN B

LAMPIRAN C

LAMPIRAN D

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Kebutuhan energi listrik semakin meningkat seiring berjalannya waktu dari tahun ke tahun. Hal itu diiringi dengan laju pertumbuhan, pengembangan wilayah, dan pembangunan. Dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik maka akan meningkatkan laju eksploitasi bahan mentah yang masih tersisa untuk menjadi bahan bakar pembangkit listrik. Padahal energi seperti minyak, gas, dan batubara akan habis suatu saat. Untuk memperlambat laju eksploitasi tersebut bisa dilakukan dengan pemanfaatan energi alternatif. Energi alternatif merupakan sumber energi yang ramah lingkungan dan pengoperasian yang cukup murah.

Ada banyak jenis-jenis energi alternatif ada dan beberapa dari energi alternatif tersebut sudah digunakan. Beberapa contoh jenis energi alternatif yaitu biofuel, biomassa, air, angin, matahari, gelombang laut, dan pasang surut. Dengan panjang garis pantai ke 2 didunia seharusnya indonesia bisa memanfaatkan gelombang laut dan pasang surut sebagai energi alternatif yang digunakan. Padahal energi gelombang laut bisa menghasilkan listrik sekitar 246 hingga 1.968.235 watt dengan menggunakan sistem kolom air berosilasi (Utami 2010). Tidak menutup kemungkinan dengan menggunakan sistem yang berbeda akan menghasilkan energi listrik yang lebih besar lagi.

Ada beberapa jenis sistem untuk mengubah energi gelombang menjadi energi listrik. Pada dasarnya prinsip kerja semua sistem tersebut sama yaitu dengan cara mengakumulasi energi gelombang untuk memutar turbin generator. Cara mengakumulasi energi tersebut bisa dengan memanfaatkan gerakan yang ditimbulkan oleh gelombang seperti gerak heave, pitch, dan roll.

Banyak desain-desain *wave energy converter* (WEC) memanfaatkan gerakan heave untuk mengubah energi gelombang menjadi energi listrik. Tapi ada juga beberapa desain yang memanfaatkan gerakan pitch. Salah satu contoh yang memanfaatkan gerak pitching untuk mengubah energi gelombang menjadi energi listrik yaitu jenis oyster.

Untuk *wave energy converter* (WEC) yang menggunakan piston kebanyakan memanfaatkan gaya heave.

Pada penelitian kali ini dilakukan desain WEC yang memanfaatkan gaya pitching pada *articulated tower* untuk menggerakkan piston pada WEC dengan variasi ukuran tabung pemberat.

1.2. PERUMUSAN MASALAH

Adapun perumusan masalah pada penelitian tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Bagaimana gerak WEC silinder jika terkena beban gelombang dengan variasi ukuran silinder?
2. Berapa besar kecepatan air yang dipompa bisa dipompa dengan piston yang digerakkan oleh WEC?

1.3. TUJUAN

Adapun tujuan dari penelitian tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui gerakan *articulated tower* ketika diberikan gaya gelombang sesuai variasi ukuran silinder
2. Untuk mengetahui kecepatan air terbesar yang bisa dipompa menggunakan piston yang digerakkan oleh WEC

1.4. MANFAAT

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai pengetahuan tentang energi gelombang laut yang bisa dijadikan sebagai energi alternatif dan pengetahuan bahwa gerakan tidak stabil dari *articulated tower* bisa dimanfaatkan dalam desain WEC

1.5. BATASAN MASALAH

Dalam penelitian ini diberikan batasan-batasan masalah untuk mempermudah penelitian. Adapun batasan – batasan masalah tersebut sebagai berikut:

1. Desain WEC berkonfigurasi *articulated tower*
2. Bouyancy chamber berbentuk silinder
3. Variasi Ukuran silinder yaitu pada diameter dan tinggi

4. Sistem kerja piston dengan sistem hidrolik
5. Kedalam air laut berada pada laut transisi pada kedalaman 10m – 20m
6. Data Gelombang yang digunakan pada perairan selatan jawa timur
7. Analisa gerakan WEC dilakukan berdasarkan gelombang reguler Airy perairan menengah
8. Tidak dilakukan desain rinci dan analisa kekuatan struktur *WEC*
9. Analisa hanya sampai laju air yang dipompa oleh piston\
10. Joint pada Leg berbentuk Roller Joint

1.6. SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika yang digunakan dalam tugas akhir ini, antara lain:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan tentang hal-hal yang menjadi latar belakang penelitian tugas akhir ini. Serta dijelaskan juga permasalahan yang akan dibahas, tujuan dilakukannya penelitian, manfaat, batasan-batasan masalah yang berguna untuk membatasi permasalahan tugas akhir, dan sistematika penulisan tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab ini dijelaskan tentang pustaka-pustaka yang menunjang untuk melakukan tugas akhir serta teori-teori yang berguna untuk membantu menyelesaikan permasalahan yang akan dibahas.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan langkah-langkah pengerjaan tugas akhir dari awal sampai dengan tugas akhir ini selesai.

BAB IV ANALISIS DAN HASIL PEMBAHASAN

Pada bab ini dibahas langkah-langkah proses melakukan analisa dari permasalahan yang diangkat pada tugas akhir. Serta melakukan komparasi antara hasil perhitungan manual yang dilakukan dan output dari *software* akan dibahas pada bab ini.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi tentang kesimpulan dari tugas akhir dan saran untuk penelitian sejenis yang akan dilakukan selanjutnya. Serta pada kesimpulan pada bab ini untuk menjawab permasalahan yang dirumuskan di Bab I.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. TINJAUAN PUSTAKA

Teknologi pemanfaatan energi gelombang laut masih sangat minim. Padahal energi gelombang laut sudah terbukti memiliki beberapa keuntungan yaitu sumber energi bisa diperbaharui dan prosesnya ramah lingkungan karena desain yang digunakan ramah lingkungan dan juga pengoperasian yang mudah. Pembangkit listrik tenaga gelombang ini membutuhkan biaya yang murah dalam pengoperasian. Untuk perusahaan pengembangan desain *wave energy converter* sangat penting untuk mengestimasi daya listrik yang dihasilkan sehingga bisa mendapatkan keuntungan (Rahman dkk, 2013).

Ada beberapa tipe *wave energy converter* (WEC) yang sudah dikembangkan didunia. Tipe – tipe WEC yaitu Attenuator, Point Absorber, Submerged Pressure Differential Devices, Oscillating Water Column, Overtopping Device, dan Oscillating Wave Surge Converter (Bjorn).

Beberapa daerah didunia telah membuktikan pengembangan konversi energi gelombang yang komersial seperti Morro Bay dan Point Arguello. Penelitian dilakukan dengan prediksi model dari energi gelombang yang dihasilkan. Pada saat kondisi gelombang pada musim dingin diprediksi mampu menghasilkan daya 30-35kW/m, lalu untuk kondisi gelombang musim panas 12-14 kW/m. WEC jenis wave dragon mampu memproduksi daya maksimal 7.429.000 kWh sedangkan tipe pelamis mampu menghasilkan daya listrik maksimal sebesar 759 kWh (Dmitri 2010).

Sebuah penelitian desain WEC (Jayashankar dkk 2011) untuk menghasilkan 100 GWh. Pada OWC plant mampu memproduksi rata-rata efisiensi diatas 60% dengan menggunakan *a twin unidirectional turbine power. twin unidirectional turbine power* bisa menggunakan generator dengan single turbin, untuk menangkap gaya keluaran dari pneumatik pada *multiple* OWC. Sebelas turbine generator dipasang dengan diameter 4,5m pada *breakwater* sepanjang 660m yang mampu memproduksi 100GWh dalam periode selama 2 tahun beroperasi.

Untuk beberapa perairan di Indonesia juga bisa memanfaatkan tipe OWC. Daya terkecil yang dihasilkan yaitu sebesar 246 watt pada perairan selat malaka. Untuk

jumlah listrik yang dihasilkan tersebut sudah mampu memberikan kontribusi daya listrik ke 18 rumah nelayan. Potensi terbesar pemanfaatan OWC di laut Indonesia yaitu pada laut selatan Banten hingga Jawa Barat, laut Selatan Jawa Tengah, laut Selatan Jawa Timur, dan wilayah laut Arafuru. Pada laut-laut tersebut daya listrik yang dihasilkan mencapai 1.968.235 watt (Utami 2010).

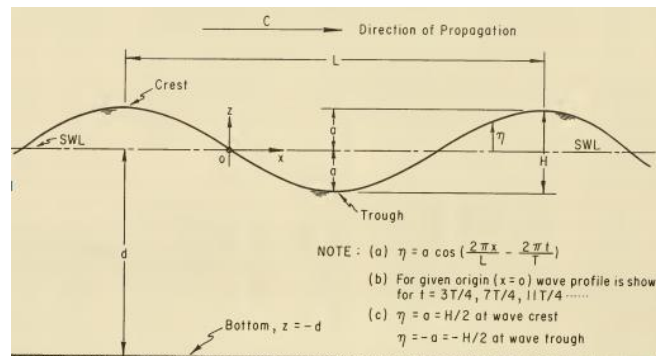
Dilaut selatan jawa tidak hanya bisa memanfaatkan WEC tipe OWC tetapi juga bisa memanfaatkan sistem bandul untuk mengkonversi energi. Sistem bandul mampu menghasilkan daya maksimum 135 watt dan daya minimum sebesar 88 watt. Efisiensi pembangkitan daya listrik menggunakan sistem bandul sebesar 42,29%. Sistem bandul dapat dikembangkan dengan mengganti jenis alternator yang dipasang serta jumlah roda gigi. Dengan menggunakan sistem bandul tinggi gelombang berbanding lurus dengan kecepatan datang gelombang, kecepatan bandul serta daya yang mampu dihasilkan (Winawang 2014).

Dalam pengembangan energi gelombang laut juga bisa memanfaatkan sistem pendulum pada lengan angguk. Semakin panjang lengan yang didesain maka akan semakin besar gaya yang dihasilkan oleh lengan angguk. Semakin tinggi permukaan air maka akan semakin besar gaya yang dihasilkan (Eky 2013).

2.2. DASAR TEORI

2.2.1. Gelombang Laut

Gelombang laut telah diamati dari zaman ke zaman. Arisototeles pada tahun 384 - 322 SM telah mengamati hubungan antara angin dan gelombang. Namun hingga saat ini pengetahuan tentang mekanisme terbentuknya gelombang masih belum sempurna. Belum sempurnanya tersebut dikarenakan model matematika mekanisme tersebut didasarkan pada dinamika fluida ideal sedangkan pada kondisi nyata lautan tidak semuanya ideal. Berikut ini Gambar 2.1 menunjukkan bentuk gelombang laut ideal.



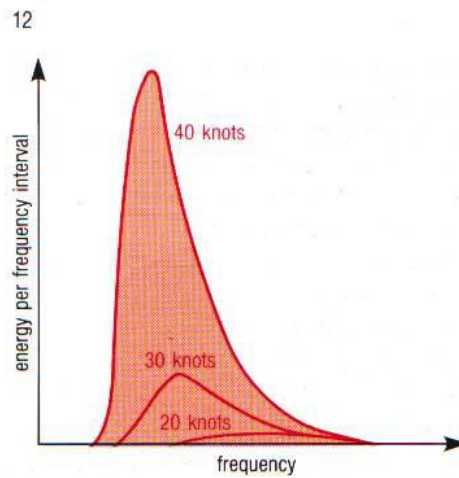
Gambar 2.1 Gelombang laut ideal (SPM 1984)

Benjamin Franklin pada tahun 1779 mengatakan bahwa, “Udara yang bergerak yaitu angin, melewati permukaan yang halus, akan mengganggu permukaan dan menjadikan permukaan tersebut bergelombang jika angin bertiup terus maka akan menjadi elemen gelombang”. Dari pernyataan benjamin berarti jika suatu fluida mempunyai kecepatan berbeda bertemu maka akan terjadi sebuah gesekan, ketika gesekan tersebut terjadi maka akan ada transfer energi.

Pada tahun 1925 Harold Jeffrey S menganggap bahwa gelombang mendapatkan energi dari angin karena adanya perbedaan tekanan yang disebabkan oleh puncak gelombang. Akan tetapi persepsi Harold tersebut tidak bisa menjelaskan untuk gelombang yang sangat kecil.

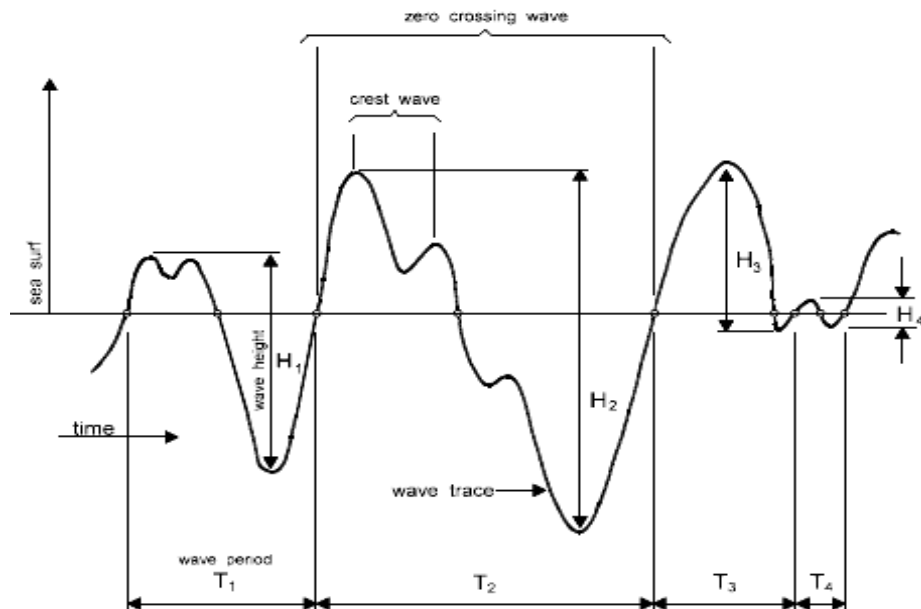
Ukuran gelombang dilaut dalam terbentuk tidak hanya oleh kecepatan angin tetapi juga dipengaruhi oleh lama angin bertiup. Ukuran gelombang juga dipengaruhi juga oleh *fetch*. Jika *fetch* besar dan angin bertiup dengan kecepatan konstan maka akan terjadi keseimbangan dimana energi didisipasi oleh gelombang dengan laju yang sama pada saat gelombang menerima energi dari angin. Ketika kondisi keseimbangan terjadi hal ini disebut dengan *fully developed sea*.

Variasi kecepatan angin akan menghasilkan variasi ukuran gelombang, fenomena ini biasa disebut dengan medan gelombang. Gelombang yang datang dari suatu daerah ke daerah lain akan mempengaruhi kisaran ukuran gelombang. Menurut para ahli medan gelombang merupakan spektrum energi dari gelombang tersebut. Energi tersebut sebanding dengan hasil kuadrat dari tinggi gelombang. Pada Gambar 2.2 menunjukkan variasi spektrum energi gelombang dengan variasi kecepatan angin yaitu 20 knot, 30 knot, dan 40 knot.



Gambar 2.2 Spektrum energi gelombang dengan variasi kecepatan (Supangat dan Susanna 2007)

Tinggi gelombang sangat mungkin untuk diketahui dengan mudah jika amplitudo dan frekuensi gelombang diketahui. Karena tinggi gelombang dipengaruhi oleh 2 hal tersebut. pada Gambar 2.3 menunjuk hubungan antara amplitudo dan periode gelombang.



Gambar 2.3 Catatan Gelombang (MHL 2015)

Untuk keperluan penelitian tinggi gelombang yang digunakan biasanya tinggi gelombang signifikan (H_s). Tinggi gelombang signifikan adalah tinggi rata-rata dari sepertiga gelombang tertinggi dari seluruh jumlah tinggi gelombang yang ada dalam

periode waktu tertentu. Dalam catatan gelombang juga terdapat tinggi gelombang maksimum. Jika kecepatan angin meningkan makan H_s pun akan meningkat. Pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 ditunjukan hubugnan antara H_s dan kecepatan angin oleh Skala Beaufort.

Tabel 2.1 Hubungan Kecepatan angin dan tinggi gelombang skala beaufort
(Supangat dan Susanna 2007)

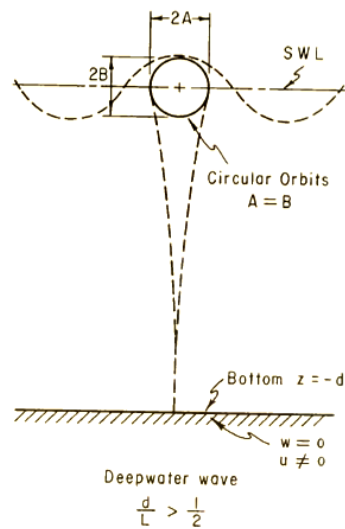
No. Beaufort	Nama	Kecepatan angin		Permukaan laut	Tinggi gelombang (m)
		knot	ms ⁻¹		
0	Calm	<1	0.0-0.2	Laut seperti sebuah cermin	0
1	Light Air	1-3	0.3-1.5	Riak tidak ada buih di puncak	0.1 – 0.2
2	Light breeze	4-6	1.6-3.3	Wavelet kecil; puncak terlihat tetapi tidak pecah	0.3-0.5
3	Gentle breeze	7-10	3.4-5.4	Wavelet besar; puncak mulai pecah	0.6-1.0
4	Moderate breeze	11-16	5.5-7.9	Gelombang kecil, menjadi lebih lama	1.5
5	Fresh breeze	17-21	8.0-10.7	Gelombang pertengahan dengan bentuk yang lebih lama; banyak semburan air	2.0
6	Strong breeze	22-27	10.8-13.8	Pembentukan gelombang besar; puncak dengan buih putih dimana-mana dan kemungkinan semburan air	3.5
7	Moderate gale	28-33	13.9-17.1	Buih putih dari gelombang pecah mulai bertiup dalam garis; kabut mulai terlihat	5.0
8	Fresh gale	34-40	17.2-20.7	Gelombang tinggi setengah dari panjang	7.5

Tabel 2.2 Lanjutan hubungan kecepatan angin dan tinggi gelombang skala beaufort (Supangat dan Susanna 2007)

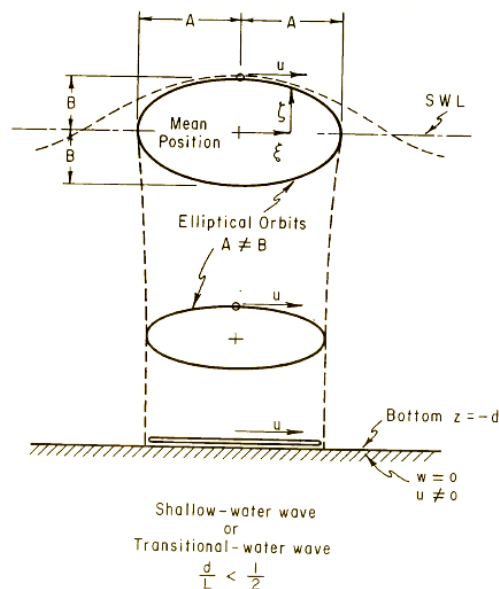
				terbesar; sisi puncak pecah menjadi kabut; buih ditiupkan dalam garis yang jelas	
9	Strong gale	41-47	20.8-24.4	Gelombang tinggi; garis berat dari buih; laut mulai menggulung; semburan berpengaruh pada penglihatan	9.5
10	Whole gale	48-55	24.5-28.4	Gelombang sangat tinggi dengan puncak diatasnya; permukaan laut terlihat putih seperti buih yang ditiupkan dala garis yang sangat berat; gulungan laut besar dan penglihatan berkurang	12.0
11	Storm	56-64	28.5-32.7	Gelombang tinggi pengecualian; laut tertutup dengan buih putih yang panjang; perahu kecil dan sedang mungkin hilang dipandangan dibelakang gelombang dalam waktu yang lama; penglihatan berkurang lebih jauh lagi	15.0
12	Hurricane	> 64	> 32.7	Udara berisi buih dan semburan air; laut terlihat putih dengan semburan air; penglihatan berkurang dengan cepat.	> 15

Skala beaufort bisa digunakan untuk memprediksi kecepatan angin, akan tetapi hanya valid untuk gelombang yang dibangkitan oleh cuaca lokal. Partikel air laut

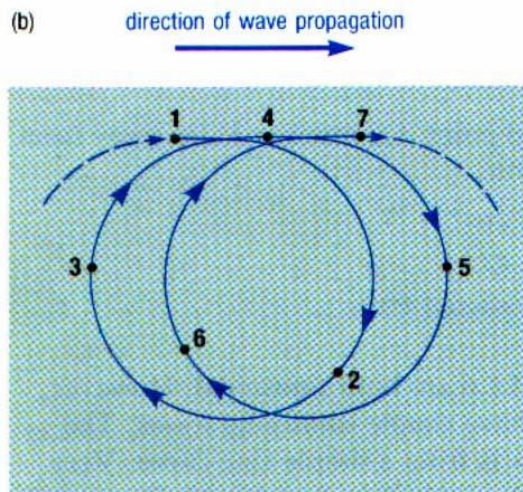
bergerak hampir menyerupai lingkaran. Pada puncak gelombang partikel bergerak searah dengan arah penjalaran gelombang sedangkan pada lembah gelombang berlawanan. Pada permukaan air laut diameter orbital berkaitan dengan tinggi gelombang. Diameter orbital tersebut akan semakin kecil seiring dengan bertambahnya kedalaman laut. Pada Gambar 2.4 sampai Gambar 2.6 dibawah ini menunjukkan gerakan partikel gelombang.



Gambar 2.4 Partikel gelombang pada laut dalam (SPM, 1984)

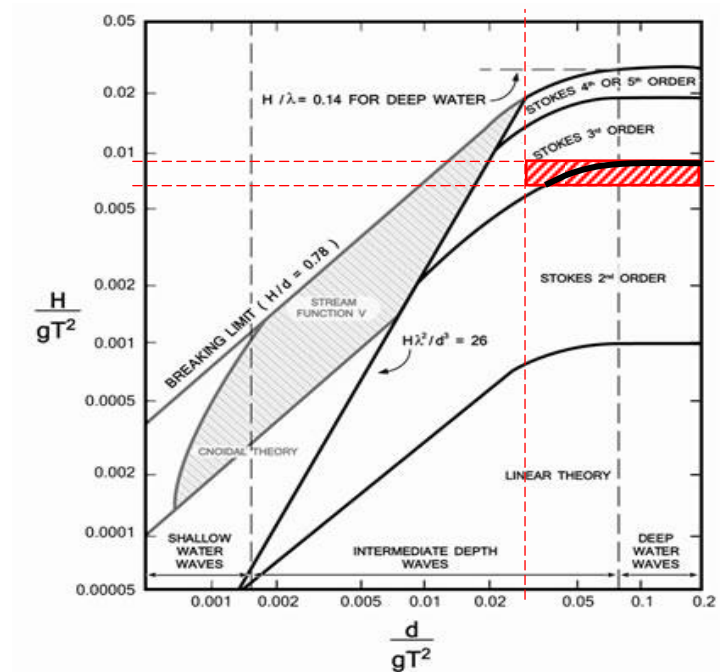


Gambar 2.5 Partikel gelombang laut dangkal dan transisi (SPM, 1984)



Gambar 2.6 Gerakan partikel dalam gelombang perairan dalam yang besar
(Supangat dan Susanna 2007)

Ada sejumlah teori gelombang reguler yang lazim digunakan dalam rekayasa kelautan, yang penerapannya akan disesuaikan dengan daerah validitasnya. Menurut Le Mehaute (1976) dan Chakrabarti (1987) pemilihan daerah validitas teori gelombang dapat ditentukan dengan memakai panduan grafis, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Daerah validitas teori gelombang (LeMehaute 1976, Chakrabarti 1987)

Dalam penyelesaian tugas akhir ini gelombang yang digunakan yaitu gelombang reguler airy perairan menengah. Persamaan airy perairan menengah digunakan untuk menghitung kecepatan dan percepatan partikel air:

$$u = \omega \zeta_0 \frac{\cosh [k_w (z+d)]}{\sinh [k_w d]} \sin(\omega t - k_w x) \quad (2.1)$$

Untuk :

u = Kecepatan Partikel air

ω = Frekuensi Gelombang

ζ_0 = Amplitudo Gelombang

t = Periode Gelombang

z = Posisi percepatan partikel gelombang yang ingin diketahui

d = kedalaman air laut

Dari persamaan kecepatan partikel gelombang diatas dilakukan penurunan satu kali terhadap waktu untuk mendapatkan persamaan percepatan partikel gelombang. Sehingga persamaan berubah menjadi:

$$\dot{u} = \omega^2 \zeta_0 \frac{\cosh [k_w (z+d)]}{\sinh [k_w d]} \cos(\omega t - k_w x) \quad (2.2)$$

Untuk :

\dot{u} = Percepatan Partikel Gelombang

ω = Frekuensi Gelombang

ζ_0 = Amplitudo Gelombang

t = Periode Gelombang

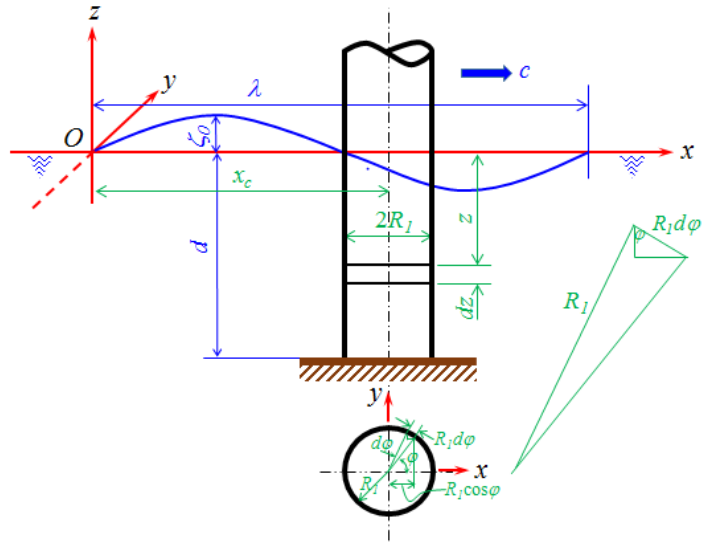
z = Posisi percepatan partikel gelombang yang ingin diketahui

d = kedalaman air laut

2.2.2. Gaya Gelombang Morrison

Secara umum gaya – gaya yang bekerja pada struktur terpancang yang disebabkan oleh gaya gelombang dibagi menjadi 3 komponen yaitu gaya tekanan dinamik, gaya

percepatan, dan gaya hambatan. Pada Gambar 2.8 merupakan silinder yang berada pada medan propagasi gelombang.



Gambar 2.8 Silinder terpancang tegak pada medan propagasi gelombang
(Djatkiko 2014)

Gaya tekanan yang bekerja pada struktur laut terpancang tegak pada elemen $R_1 d\phi dz$ dapat dituliskan seperti rumus dibawah ini:

$$d(dF_p) = \rho g \zeta_0 e^{kz} \sin k\{(x_c + R_1 \cos \phi) - ct\} (R_1 d\phi dz) \quad (2.3)$$

Untuk :

- F_p = Gaya Tekanan
- ρ = Densitas air laut
- g = gravitasi bumi
- R_1 = Jari – jari silinder

Untuk komponen arah sumbu x

$$d(dF_p) = -\rho g \zeta_0 e^{kz} \sin k\{(x_c + R_1 \cos \phi) - ct\} (R_1 d\phi dz) \quad (2.4)$$

Integrasi gaya tekanan sekeliling silinder

$$d(dF_p) = -\rho g \zeta_0 R_1 e^{kz} dz \int_0^{2\pi} \cos \theta \sin k\{(x_c + R_1 \cos \phi) - ct\} d\phi \quad (2.5)$$

Jika dengan korelasi sudut ganda

$$d(dF_p) = -\rho g \zeta_0 R_1 e^{kz} dz \int_0^{2\pi} \{ \sin k(x_c - ct) \cos(kR_1) \cos \varphi + \sin k(x_c - ct) \cos(kR_1) \cos \varphi \} d\varphi \quad (2.6)$$

Untuk gaya horizontal per satuan kedalaman bisa dicari menggunakan rumus:

$$(dF_p) = -\rho g \zeta_0 \pi R_1^2 k e^{kz} \cos k(x_c - ct) dz \quad (2.7)$$

Gaya inersia yang bekerja pada struktur langsing terpancang tegak didapatkan dengan memasukan koefisien massa tambah pada persamaan gaya horizontal persatuan kedalaman.

$$(dF_I) = -(1 + C_m) \rho g \zeta_0 \pi R_1^2 k e^{kz} \cos k(x_c - ct) dz \quad (2.8)$$

Untuk :

C_m = Koefisien massa tambah

F_I = Gaya Inersia

Karena nilai $gk = \omega^2$ dan $kc = \omega$ jadi rumus gaya inersia bisa ditulis:

$$(dF_I) = -(1 + C_m) \rho \zeta_0 \pi R_1^2 \omega^2 e^{kz} \cos(kx_c - \omega t) dz \quad (2.9)$$

Untuk gaya hambatan yang bekerja pada silinder tegak yang proporsial dengan kecepatan partikel gelombang bisa dituliskan:

$$(dF_D) = \frac{1}{2} \rho C_D 2R_1 k^2 c^2 \zeta_0^2 e^{2kz} \sin k(x_c - ct) |\sin k(x_c - ct)| dz \quad (2.10)$$

Untuk :

C_D = Koefisien drag

F_D = Gaya Drag

Karena $\omega^2 = k^2 c^2$ maka bisa dituliskan menjadi

$$(dF_D) = \rho C_D R_1 \omega^2 \zeta_0^2 e^{2kz} \sin k(x_c - ct) |\sin k(x_c - ct)| dz \quad (2.11)$$

Gaya gelombang total persatuan panjang struktur langsing terpancang tegak atau gaya morison dapat dijumlahkan antara gaya inersia dan gaya hambatan (drag) dan bisa dituliskan:

$$(dF_T) = (dF_I) + (dF_D) \quad (2.12)$$

$$(dF_T) = -(1 + C_m)\rho\zeta_0\pi R_1^2\omega^2 e^{kz} \cos(kx_c - \omega t) \\ + (\rho C_D R_1 \omega^2 \zeta_0^2 e^{2kz} \sin k(x_c - ct) |\sin k(x_c - ct)|) dz \quad (2.13)$$

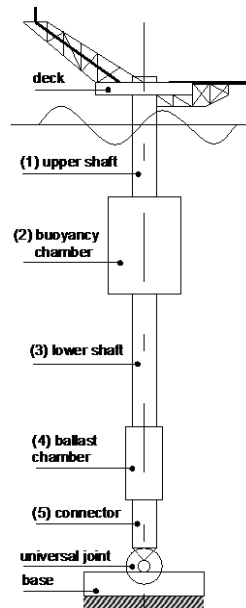
$$(dF_T) = \rho\{C_D R_1 u|u| - (1 + C_m)\pi R_1^2 \dot{u}\} dz \quad (2.14)$$

Untuk :

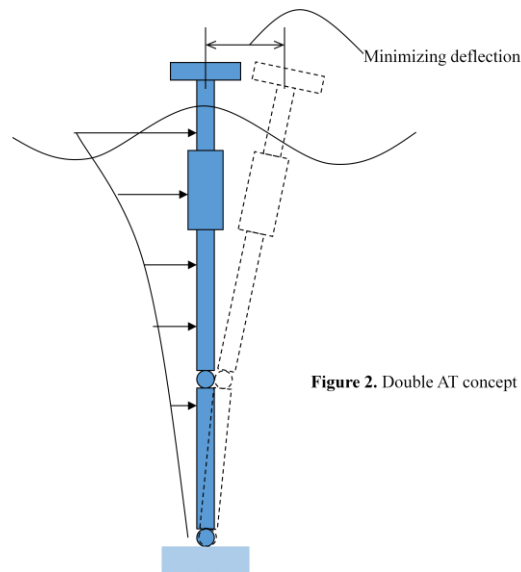
F_T = Gaya Morrison

2.2.3. Articulated Tower

Articulated tower merupakan bangunan lepas pantai yang termasuk kedalam jenis bangunan dengan konstruksi lentur. Struktur merupakan inovasi sebuah perusahaan dibidang desain *offshore structure*. Pertama kali dikembangkan pada tahun 1970an dan dipasang di north sea diperairan Argyll Field. Pada Gambar 2.9 merupakan konfigurasi dasar *articulated tower*.

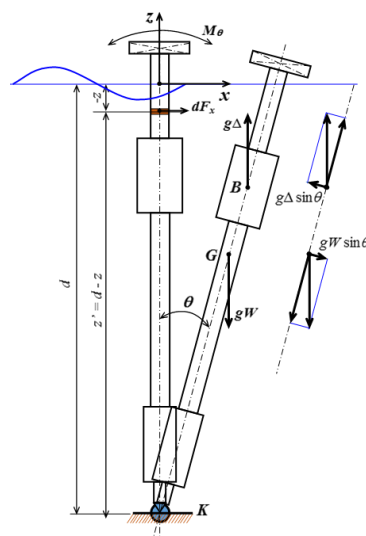


Gambar 2.9 Konfigurasi dasar *articulated tower* (Djarmiko 2016)



Gambar 2.10 Gerakan *articulated tower* ketika terkena gaya gelombang
(Djarmiko 2016)

Banyak faktor – faktor yang mempengaruhi respon gerak articulated tower. Pada Gambar 2.10 merupakan gerakan yang terjadi jika *articulated tower* terkena gaya gelombang. Pada Gambar 2.11 merupakan gerakan *articulated tower* dengan gaya – gaya yang bekerja pada struktur tersebut. Dalam menghitung gerakan dari *articulated tower* ada beberapa unsur yang harus diperhatikan yaitu kekakuan dari struktur, massa dari struktur, faktor damping, dan data-data gelombang yang mempengaruhi gerakan struktur. Untuk menghitungnya bisa menggunakan rumus.



Gambar 2.11 Gerakan *articulated tower* (Djarmiko 2016)

$$(I_{\theta} + I_{\theta A})\ddot{\theta} + C_{\theta}\dot{\theta} + K_{\theta}\theta = M_{\theta 0}\cos\omega t \quad (2.15)$$

Untuk :

I_{θ} = Momen Inersia Massa

$I_{\theta A}$ = Momen Inersia Massa Tambah

C_{θ} = Damping

K_{θ} = Kekakuan

$M_{\theta 0}$ = Momen Akibat Gaya Eksitasi

ω = frekuensi gelombang

Untuk kondisi *free oscillation* faktor damping dihilangkan dalam perhitungan. Ketika sudah mengetahui gerakan dari struktur ketika terkena gelombang. Perlu dilakukan restoring momen untuk membuat struktur kembali pada posisi semula. Untuk menghitung restoring momen bisa menggunakan rumus :

$$M_{R\theta} = (\rho g \nabla KB \sin\theta - gWK G \sin\theta)\theta \quad (2.16)$$

Untuk :

ρ = density air laut

g = gaya gravitasi

KB = titik bouyancy

KG = titik gravitasi

W = massa total *articulated tower*

θ = sudut rotasi dari *articulated tower*

Akan tetapi untuk sudut rotasi *articulater tower* yang sangat kecil. Restoring momen bisa dihitung menggunakan rumus:

$$M_{R\theta} = (\rho g \nabla KB - gWK G)\theta \quad (2.17)$$

Untuk kekakuan dan damping yang mempengaruhi gerakan dari *articulated tower* juga bisa dihitung. Untuk momen inersia dihitung tergantung bentuk-bentuk komponen struktur yang ada pada *articulated tower*.

Untuk mendapatkan kekakuan yang memenuhi ada beberapa hal yang harus diperhatikan. Bouyancy chamber berukuran tepat untuk memiliki ukuran yang cukup untuk menghasilkan gaya bouyancy, menyebabkan terjadinya momen bouyancy. Posisi bouyancy yang tepat akan meningkatkan titik bouyancy. Ballast chamber diisi

untuk menurunkan titik gravitasi. Untuk menghitung kekakuannya bisa menggunakan rumus berikut :

$$K_{\theta} = (\rho g \nabla KB - g WKG) \quad (2.18)$$

Untuk menghitung koefisien damping menggunakan rumus berikut :

$$C = \pi \cdot c_f \cdot \left(\frac{M_o(\omega, \mu=0)}{\zeta_a} \right) \quad (2.19)$$

Untuk :

$$c_f = \frac{\omega^3 \cosh^2 kd}{4\pi \rho k d \tan hkd [1 + (\sin 2kd)/2kd]} \quad (2.20)$$

ζ_a = amplitudo gelombang = $H_w/2$

H_w = tinggi gelombang

ρ = densitas air laut

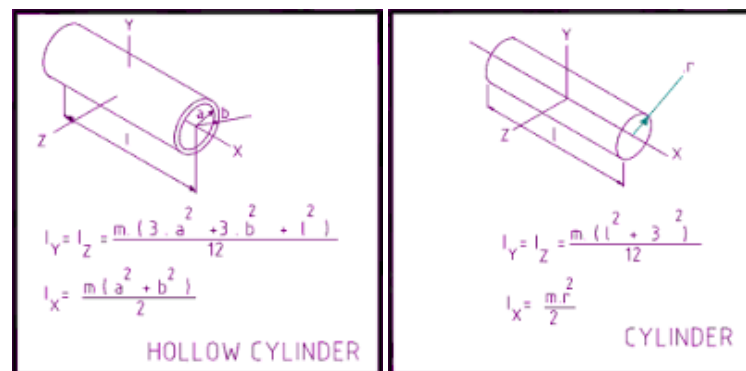
g = percepatan gravitasi

k = jumlah gelombang = $2\pi/\lambda$

λ = panjang gelombang (untuk laut dalam $\lambda = gT^2/2\pi$)

d = kedalaman air laut

Berikut ini rumus yang digunakan untuk menghitung momen inersia pada *articulated tower* yaitu pada Gambar 2.12



Gambar 2.12 Persamaan untuk menghitung momen inersia

Jadi momen inersia *articulated tower* dihitung menggunakan rumus:

$$I_{\theta} = m_0(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5)^2 + \left[\frac{1}{12} m_1(6R_1^2 + l_1^2) + m_1 \left(\frac{l_1}{2} + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 \right)^2 \right] + \left[\frac{1}{12} m_2(6R_2^2 + l_2^2) + m_2 \left(\frac{l_2}{2} + l_3 + l_4 + l_5 \right)^2 \right] + \left[\frac{1}{12} m_3(6R_3^2 + l_3^2) + m_3 \left(\frac{l_3}{2} + l_4 + l_5 \right)^2 \right] + \left[\frac{1}{12} m_4(6R_4^2 + l_4^2) + m_4 \left(\frac{l_4}{2} + l_5 \right)^2 \right] + \left[\frac{1}{12} m_5(6R_5^2 + l_5^2) + m_5 \left(\frac{l_5}{2} \right)^2 \right]$$

$$m_3 \left(\frac{l_3}{2} + l_4 + l_5 \right)^2 \Big] + \left[\frac{1}{12} m_4 (6R_4^2 + l_4^2) + m_4 \left(\frac{l_4}{2} + l_5 \right)^2 \right] + \left[\frac{1}{12} m_5 (6R_5^2 + l_5^2) + m_5 \left(\frac{l_5}{2} \right)^2 \right] \quad (2.21)$$

Untuk :

m_o = massa deck

l_n, R_n, m_n = lenght, radius dan massa dari komponen silinder

$n = 1$, upper shaft

$n = 2$, bouyancy tank

$n = 3$, lower shaft

$n = 4$, ballast tank

$n = 5$, connector

Untuk momen inersia pada massa tambah bisa dihitung menggunakan rumus:

$$I_\theta = \left[m'_1 \left(\frac{l'_1}{2} + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 \right)^2 \right] + \left[m'_2 \left(\frac{l_2}{2} + l_3 + l_4 + l_5 \right)^2 \right] + \left[m'_3 \left(\frac{l_3}{2} + l_4 + l_5 \right)^2 \right] + \left[m'_4 \left(\frac{l_4}{2} + l_5 \right)^2 \right] + \left[m'_5 \left(\frac{l_5}{2} \right)^2 \right] \quad (2.22)$$

l'_1, m'_1 = panjang dan massa tambah silinder struktur dibawah permukaan air laut

Lalu, untuk mengetahui sudut rotasi yang dihasilkan oleh *articulated tower* pada saat terkena gaya gelombang bisa menggunakan rumus :

$$\theta_0 = \frac{M_\theta / k_\theta}{\sqrt{\left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right\}^2 + \left\{ 2c_f \frac{\omega}{\omega_n} \right\}^2}} \quad (2.23)$$

Untuk :

θ_0 = Respon Struktur

M_θ = Momen akibat gaya eksitasi

K_θ = Kekakuan

ω_n = Frekuensi Natural

c_f = damping ratio

2.2.4. Response Amplitude Operator (RAO)

Informasi karakteristik gerakan bangunan laut umumnya disajikan dalam bentuk grafik dengan absisnya yaitu parameter frekuensi dan ordinatnya merupakan rasio antara gelombang pada mode tertentu (ζ_{k0}) dengan amplitudo gelombang (ζ_0) yang dikenal dengan RAO.

Frekuensi gelombang yang digunakan sebagai absis bermacam-macam tergantung keperluan analisis. Frekuensi gelombang yang digunakan yaitu frekuensi insiden (ω), frekuensi papasan (ω_e), dan frekuensi non dimensi. Frekuensi non dimensi adalah parameter yang memperhitungkan ukuran panjang bangunan (L) dan percepatan gravitasi (g) baik itu untuk yang berkaitan frekuensi gelombang insiden maupun frekuensi gelombang papasan. Rumus untuk frekuensi non dimensi yaitu:

$$\omega' = \frac{\omega}{\sqrt{g/L}} \quad (2.24)$$

$$\omega'_e = \frac{\omega_e}{\sqrt{g/L}} \quad (2.25)$$

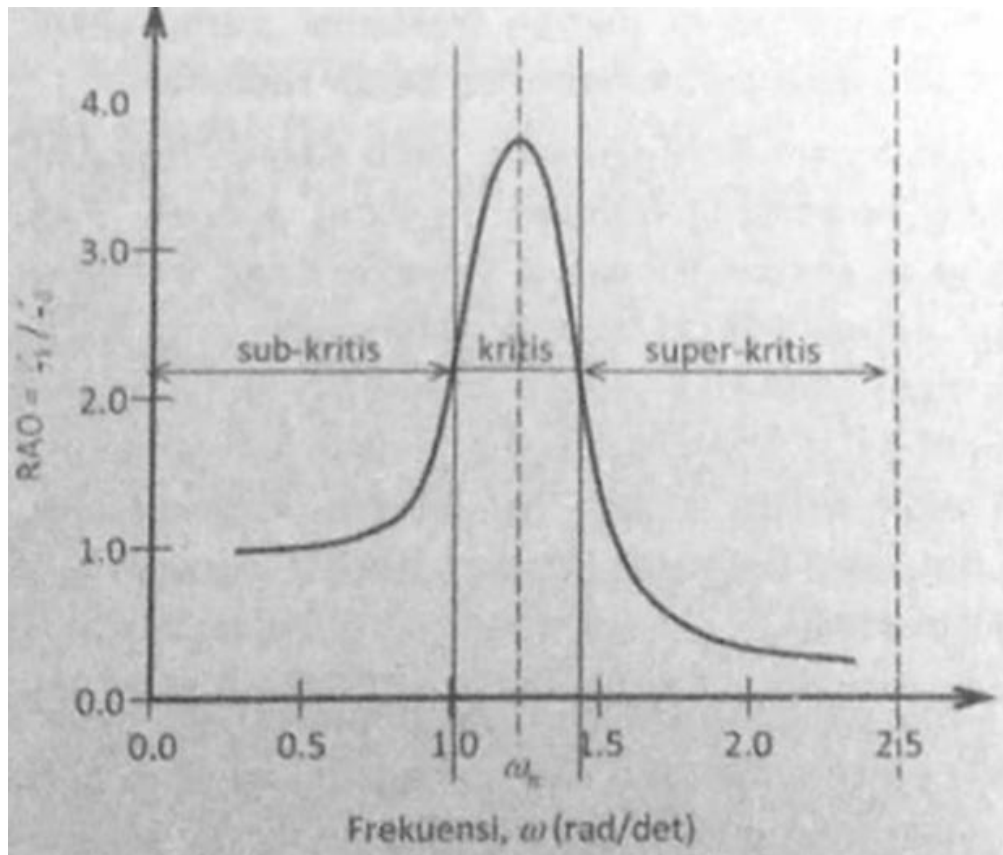
RAO untuk gerakan translasi yaitu surge, sway, dan heave dan RAO gerakan rotasi atau non dimensi berbeda. Untuk gerakan translasi RAO merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan dan amplitudo gelombang insiden sedang untuk gerakan rotasi atau non dimensi merupakan perbandingan amplitudo gerakan rotasi dengan kemiringan gelombang. Kemiringan gelombang merupakan perkalian angka gelombang dengan amplitudo gelombang insiden.

Rumus RAO untuk gerakan translasi:

$$RAO = \frac{\zeta_{k0}}{\zeta} \quad (2.26)$$

Rumus RAO untuk gerakan rotasi atau non dimensi yaitu:

$$RAO = \frac{\theta}{\zeta} \quad (2.27)$$



Gambar 2.13 Bentuk umum grafik RAO (Djarmiko 2012)

Dapat dilihat pada Gambar 2.13 secara umum respon gerakan apung dibagi menjadi 3 daerah yaitu daerah frekuensi rendah atau gelombang panjang, daerah kritis dan daerah super kritis.

- Daerah frekuensi rendah atau biasa disebut daerah sub kritis. Pada daerah ini gerakan bangunan cenderung mengikuti kontur elevasi gelombang yang panjang. Sehingga amplitudo gerakan bangunan hampir sama dengan amplitudo gelombang.
- Daerah kritis respon gerakan mengalami magnifikasi atau amplitudo gerakan akan lebih besar daripada amplitudo gelombang. Bahkan besarnya bisa mencapai beberapa kali dari amplitudo gelombang.

Daerah super kritis merupakan daerah dengan frekuensi tinggi atau periode gelombang pendek. Semakin tinggi frekuensi maka akan semakin rapat puncak – puncak gelombang yang menyebabkan respon gerakan mengecil karena seolah – olah berada pada air yang relatif datar.

2.2.5. Teknik Konversi Energi Laut Menjadi Energi Listrik

Untuk mengubah energi gelombang menjadi energi listrik ada beberapa cara. Adapun cara-cara yang bisa digunakan untuk mengkonversi energi tersebut yaitu dengan memanfaatkan gelombang laut, dan pasang surut air laut.

a. Gelombang laut

Cara memanfaatkan gelombang untuk menjadi energi listrik yaitu dengan memanfaatkan energi kinetik yang ada didalam gelombang laut untuk menggerakkan turbin generator. Salah satu cara untuk memanfaatkan energi gelombang yaitu seperti Gambar 2.14 dibawah ini.



Gambar 2.14 Pemanfaatan energi kinetik dalam gelombang laut (Rodrigues 2005)

Ketika ombak naik air laut akan masuk kedalam ruang generator, lalu air yang naik menekan udara yang keluar dari ruang generator. Ketika air laut keluar dari ruang generator dan turun akan memutar turbin generator.

b. Pasang surut air laut

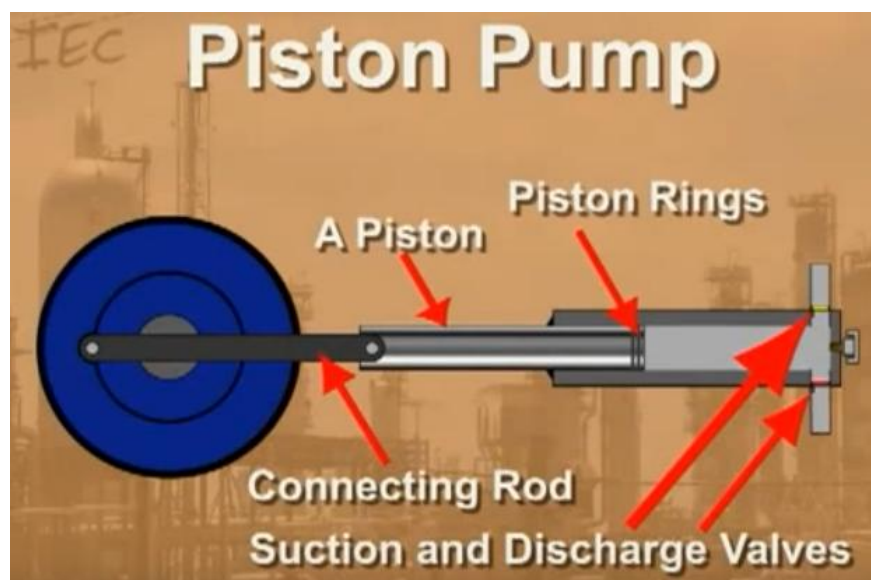
Pemanfaatan pasang surut merupakan salah satu cara untuk memanfaatkan energi laut menjadi energi listrik. Ketika air pasang air laut akan ditampung dalam reservoir selanjutnya akan bekerja seperti PLTA pada umumnya. Untuk memanfaatkan energi laut dengan memanfaatkan pasang surut ini agar optimal gelombang pasang dan surut harus berbeda cukup besar.

2.2.6.Sistem Penggerak Piston

Sistem kerja piston ada 2 yaitu sistem pneumatik dan sistem hidrolik. Sistem pneumatik dan sistem hidrolik mempunyai cara kerja yang sama hanya berbeda pada elemen penggerakannya saja. Sistem pneumatik menggunakan udara untuk penggerakannya sedangkan sistem hidrolik menggunakan cairan sebagai penggerakannya. Sistem hidrolik dan pneumatik memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing.

Sistem pneumatik memiliki kelebihan ramah lingkungan, udara yang digunakan sebagai penggerak tak terbatas, lebih cepat dan responsif, dan harganya murah. Akan tetapi juga memiliki kekurangan seperti daya mekanik yang dihasilkan kecil, butuh perawatan yang lebih tinggi, pergerakannya kotor dan mengandung air sehingga gesekan antara silinder piston dan rumah silinder besar akan mempercepat kerusakan.

Untuk sistem hidrolik mempunyai kelebihan daya yang dihasilkan besar, silinder piston lebih awet dan oli yang digunakan sebagai penggerak tidak akan habis jika tidak terjadi kebocoran. Sedangkan kekurangannya tidak ramah lingkungan, harga oli mahal, dan kurang responsif. Pada Gambar 2.15 dibawah ini merupakan mekanisme kerja pompa piston dengan sistem hidrolik.



Gambar 2.15 Mekanisme kerja piston

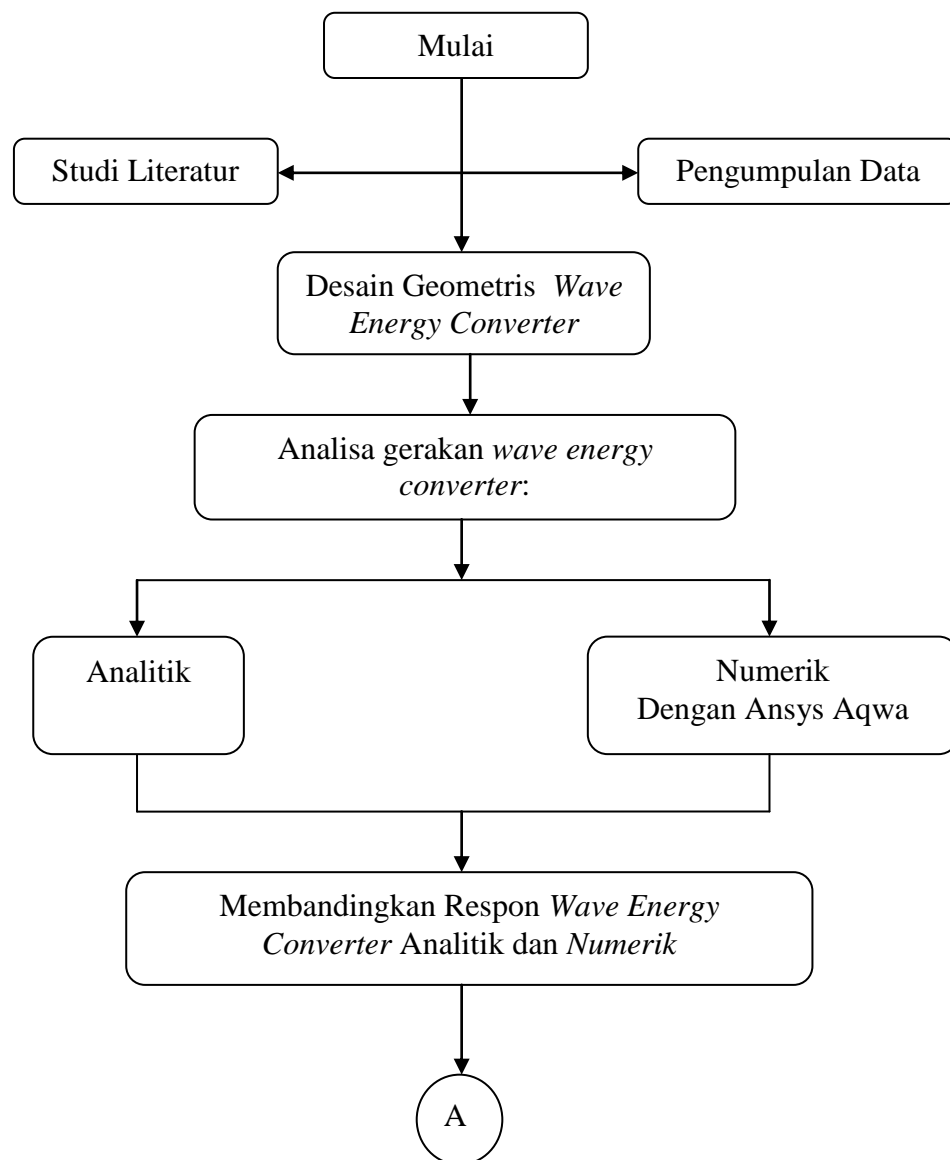
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

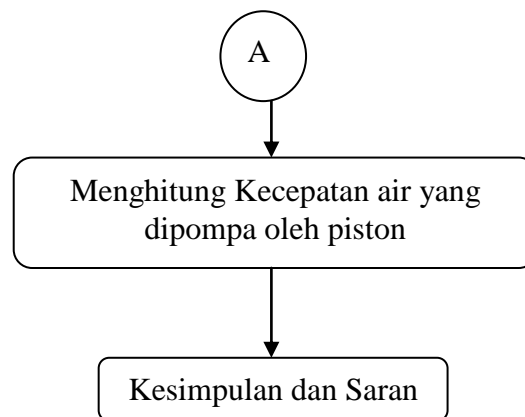
METODOLOGI PENELITIAN

3.1. *FLOWCHART* PENELITIAN

Gambar 3.1 dibawah ini menjelaskan alur pengerjaan tugas akhir dari awal sampai dengan selesai.



Gambar 3.1 *Flowchart* Pengerjaan Tugas Akhir



Gambar 3.1 *Flowchart* Pengerjaan Tugas Akhir (lanjutan)

3. 2. PENJELASAN DIAGRAM ALIR

1. Studi Literatur

Pada tahapan studi literatur penulis mengumpulkan informasi – informasi yang berhubungan dengan tugas akhir. Studi – studi tersebut dilakukan bertujuan untuk membantu dasaran teori tugas akhir. Sumber studi literatur penulis ada bermacam-macam seperti buku, jurnal, web, ataupun tugas akhir yang ada hubungannya dengan penelitian tugas akhir ini.

2. Pengumpulan Data

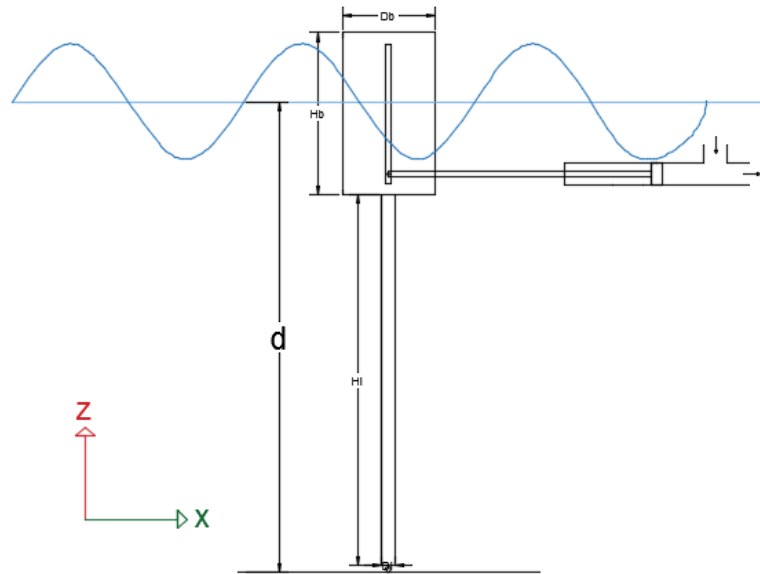
Setelah melakukan studi literatur dan mengetahui data-data apa saja yang diperlukan untuk melakukan penelitian ini. Maka dilakukan pengumpulan data-data yang menunjang penelitian tugas akhir ini. Adapun data-data yang diperlukan dalam pengerjaan tugas akhir ini berupa data ukuran tabung dan data gelombang. Adapun data-data yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

Data gelombang (BMKG didalam Utami 2011) :

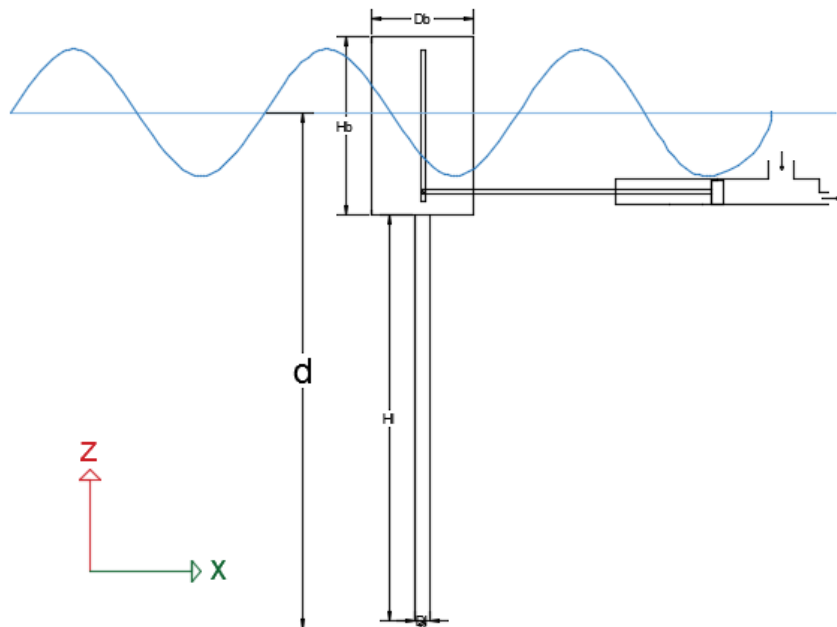
Tinggi Gelombang Signifikan (H_s)	= 0,5m – 2m
Tinggi gelombang maksimum (H_{maks})	= 0,7m – 2,5m
Frekuensi Gelombang (ω)	= 0,1rad/s – 2rad/s
Periode Gelombang (T)	= 2,51s – 6,51s
kedalaman air (d)	= 10m-20m
densitas air laut (ρ)	= 1025kg/m ³
Percepatan gravitasi (g)	= 9,8 m/s ²
Ukuran silinder <i>Bouyancy Chamber</i> bervariasi	

3. Desain Geometris *Wave Energy Converter*

Pada tahap ini dilakukan desain awal ini dilakukan penentuan ukuran tuas piston yang sesuai untuk setiap variasi ukuran tabung. Bentuk silinder ruang piston diasumsikan dengan dua jenis berbeda yaitu salah satu diameter tetap pada Gambar 3.2 dan diameter ujung mengecil pada Gambar 3.3



Gambar 3.2 Desain awal WEC diameter piston konstan



Gambar 3.3 Desain awal WEC diameter salah satu ujung piston mengecil

4. Analisa Gerakan *Wave Energy Converter*

Pada tahapan ini dilakukan perhitungan sudut kemiringan yang terjadi pada *wave energy converter* untuk masing-masing variasi ukuran tabung. Sudut kemiringan ini berguna untuk mendesain tuas piston pada *wave energy converter*. Analisa numerik menggunakan software Ansys Aqwa.

5. Memodelkan *Wave Energy Converter* Menggunakan Software Ansys Aqwa

Pada tahap ini dilakukan permodelan *wave energy converter* dengan menggunakan software untuk mengetahui output kemiringan yang terjadi jika dilakukan permodelan menggunakan software ANSYS Aqwa.

6. Membandingkan Respon *Wave Energy Converter* Analitik Dan Output ANSYS Aqwa

Setelah mengetahui *output* dari software. Pada tahap ini dilakukan perbandingan hasil respon yang didapatkan secara analitik dan *output* ANSYS Aqwa. Untuk mengetahui seberapa besar perbedaan yang terjadi antara hasil analisa analitik dan numerik.

7. Menghitung Kecepatan Air Yang Dipompa Oleh Piston

Setelah kemiringan dan ukuran panjang tuas yang sesuai untuk *wave energy converter*. Pada tahap ini dilakukan perhitungan kecepatan air yang bisa dipompa oleh piston untuk masing-masing variasi ukuran tabung karena untuk setiap ukuran tabung memiliki bouyancy yang berbeda yang akan mempengaruhi *restoring moment*.

8. Kesimpulan dan saran

Setelah dilakukan semua proses tahapan pengerjaan tugas akhir dan telah mendapatkan hasil dilakukan penarikan kesimpulan untuk menjawab perumusan masalah dan memberikan saran untuk penelitian sejenis selanjutnya.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. PENENTUAN UKURAN SILINDER *BOUYANCY CHAMBER* (BC) DAN *LEG WEC*

Menentukan ukuran silinder dalam penelitian WEC berkonfigurasi *articulated tower* merupakan hal yang sangat penting. Karena jika ukuran silinder BC tidak tepat maka respon yang akan didapatkan tidak sesuai dengan harapan. Penentuan ukuran silinder BC dilakukan dengan trial n error. Ukuran BC yang ditentukan yaitu diameter, tinggi, tebal, dan bagian yang tercelup air dan tidak tercelup air. Lalu untuk diameter, tinggi, dan tebal langsung ditentukan. Diameter leg 0,3m dan tebal 0,1m. Untuk ketinggian leg WEC tergantung dari BC yang tercelup air dan kedalaman.

Untuk tahap pertama percobaan penentuan diameter, tinggi, dan tebal BC hanya dilakukan dengan satu variasi kedalaman dan satu variasi ukuran. Trial n error dilakukan pada kedalaman 10 dan ukuran silinder $D = 2\text{m}$, dan $H = 3,5\text{m}$ $t=10\text{m}$. Setelah dicoba dalam perhitungan respon hasil yang didapat sudah sesuai seperti yang diharapkan. Hasil yang diharapkan yaitu kurang dari 90° . Sudut yang dihasilkan dari gerakan WEC cukup besar tetapi tidak melebihi batas maksimal gerakan WEC. Sudut yang dihasilkan yaitu $73,71^\circ$.

Setelah respon untuk satu variasi ukuran silinder dikatakan memenuhi harapan. Dilakukan percobaan untuk menentukan variasi kedua dan ketiga dari BC. Langkah-langkah yang dilakukan sama seperti menentukan variasi ukuran sebelumnya. Untuk variasi ukuran BC yang kedua yaitu $D = 3\text{m}$, $H = 4,5\text{m}$, dan $t = 25\text{mm}$. Setelah dicoba dalam perhitungan respon sudut maksimum yang dihasilkan $66,76^\circ$. Untuk variasi ukuran BC yang terakhir $D = 4\text{m}$, $H = 5,5\text{m}$, dan $t = 30\text{mm}$. Setelah dicoba dalam perhitungan respon sudut maksimum yang dihasilkan yaitu $63,25^\circ$. Penentuan variasi ukuran yang kedua dan ketiga masih pada variasi kedalaman yang sama yaitu pada kedalaman 10m.

4.2. ANALISA RESPON WEC SECARA ANALITIK

Setelah mendapatkan ukuran silinder BC yang sesuai untuk setiap variasi ukuran dilakukan perhitungan respon dari WEC untuk setiap variasi kedalaman. Kedalaman yang digunakan pada penelitian ini yaitu 10-20m. Untuk mempermudah perhitungan kedalaman yang digunakan hanya 3 variasi yaitu pada kedalaman 10m, 15m dan 20m. Untuk tinggi gelombang menggunakan gelombang maksimum yaitu 2,5m. Lalu, untuk frekuensi yang digunakan dari 0,1rad/s – 2rad/s.

Setelah semua parameter yang diperlukan untuk perhitungan ditentukan barulah proses perhitungan dilakukan. Hal pertama yang dilakukan menghitung respon yaitu mencari kekakuan, massa dan momen inersia dari WEC tersebut untuk mendapatkan frekuensi natural dari WEC.

Setelah mengitung frekuensi natural barulah tahap awal perhitungan respon dilakukan. Untuk menghitung respon WEC ini diperlukan perhitungan gaya inersia dan gaya drag. Setelah mendapatkan gaya-gaya tersebut dilakukan perhitungan momennya lalu dijumlahkan. Untuk setiap variasi frekuensi diambil momen maksimumnya yang akan dimasukan kedalam perhitungan respon. Faktor hambatan yang digunakan dalam perhitungan respon WEC ini yaitu 0,05.

Setelah semua perhitungan dilakukan untuk setiap variasi ukuran BC dan variasi kedalaman yang telah ditentukan didapatkan hasil. Pada tabel dibawah ini merupakan hasil perhitungan kekakuan pada Tabel 4.1 dan momen inersia pada Tabel 4.2 yang diperlukan untuk menghitung frekuensi natural WEC:

Tabel 4.1 Kekakuan WEC

Kekakuan (N/m)			
	D=2m H=3,5m t=15mm	D=3m H=4,5m t=25mm	D=4m H=5,5m t=30mm
d=10m	225519,99	717956,63	2087256,091
d=15m	216598,79	1051099,003	3363479,966
d=20m	104587,21	1281150,986	4536613,46

Tabel 4.2 Momen Inersia WEC

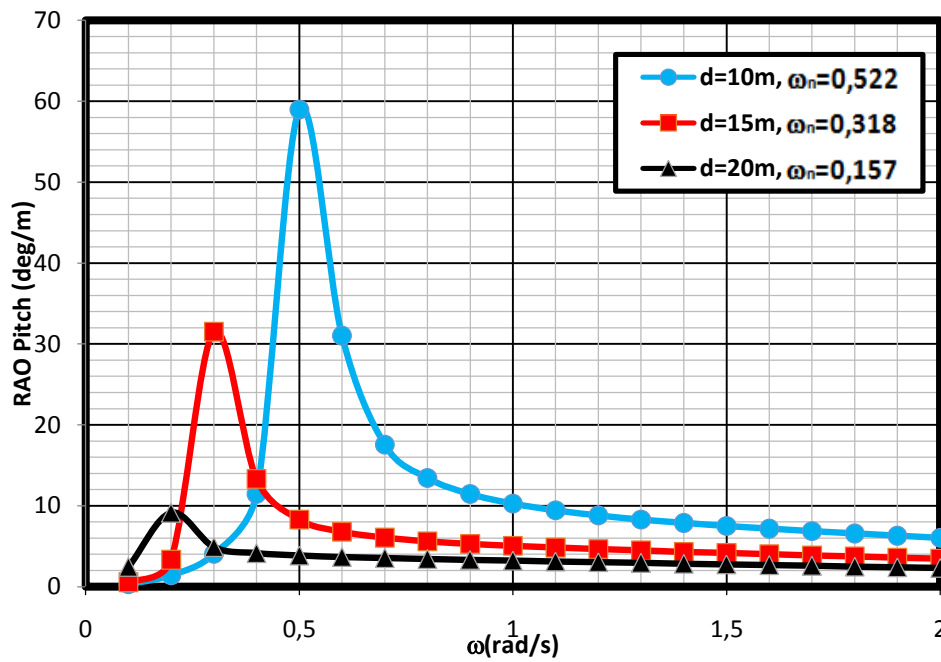
	Momen Inersia Total (kg.m ²)		
	D=2m H=3,5m t=10mm	D=3m H=4,5m t=25mm	D=4m H=5,5m t=30mm
d=10m	827847,102	2599465,319	5111766,734
d=15m	2145893,796	6528470,204	13188710,557
d=20m	4252031,272	12419744,703	25237878,820

Setelah dilakukan perhitungan momen inersia total dan kekakuan WEC dihitung frekuensi natural WEC yang digunakan dalam perhitungan respon WEC. Pada tabel 4.3 merupakan hasil perhitungan frekuensi natural WEC. Besar kecil frekuensi natural sangat dipengaruhi oleh nilai momen inersia WEC. Semakin besar momen inersia WEC maka frekuensi natural WEC akan semakin kecil begitu juga sebaliknya, jika momen inersia WEC semakin besar maka frekuensi naturalnya akan semakin besar. Berikut ini hasil perhitungan frekuensi natural pada Tabel 4.3 :

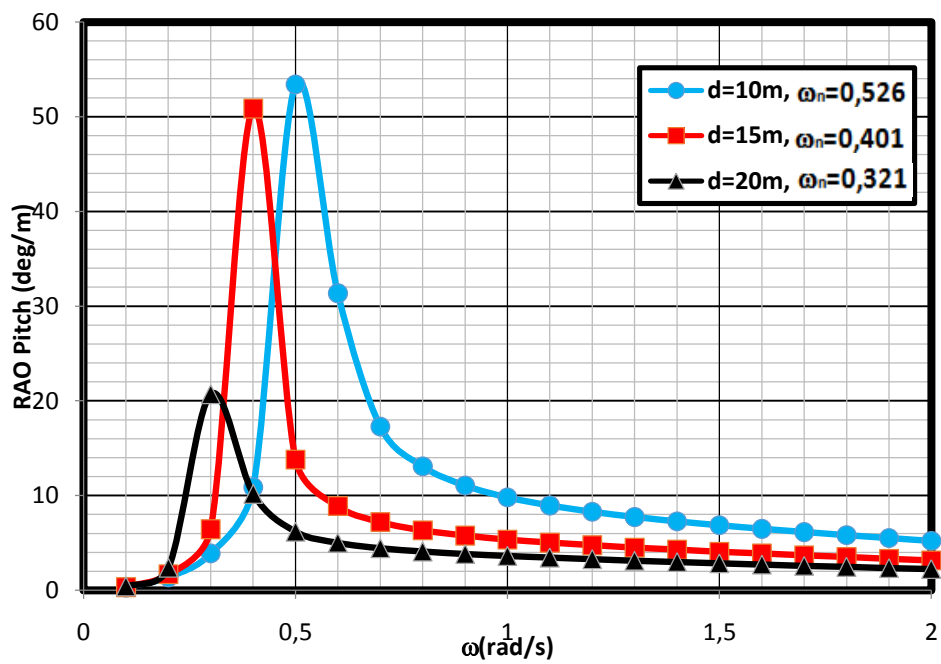
Tabel 4.3 Frekuensi Natural WEC

Frekuensi Natural (rad/s)			
	D=2m H=3,5m t=15mm	D=3m H=4,5m t=25mm	D=4m H=5,5m t=30mm
d=10m	0,522	0,526	0,639
d=15m	0,318	0,401	0,505
d=20m	0,157	0,321	0,424

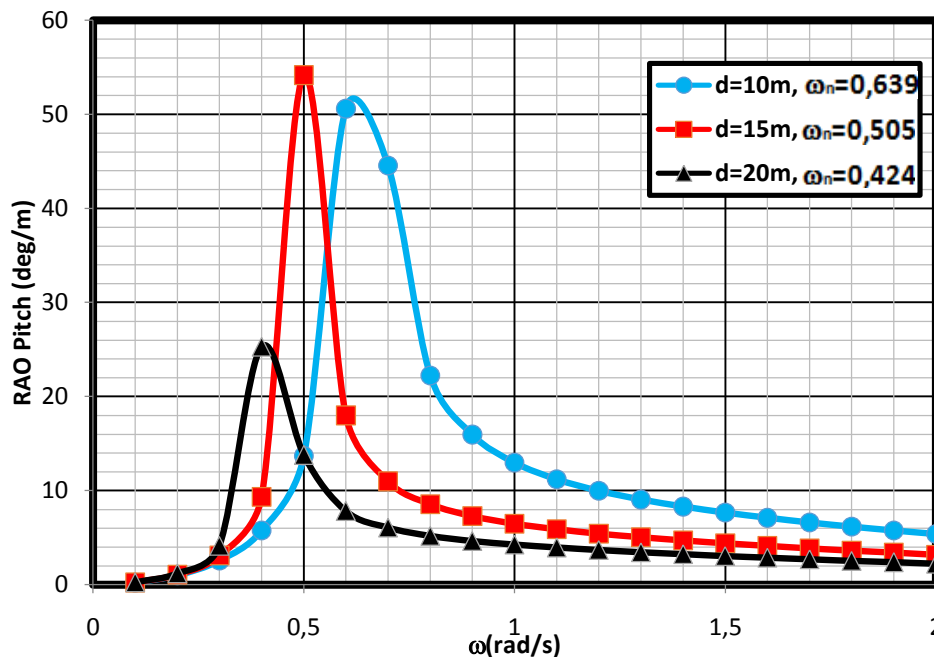
Setelah dilakukan perhitungan respon dengan mempertimbangkan momen maksimum yang terjadi pada setiap variasi kekakuan, frekuensi, faktor hambatan, dan amplitudo gelombang. Setelah semua parameter tersebut dimasukan kedalam perhitungan didapatkan grafik RAO (*Response Amplitude Operator*) WEC dengan BC penampang lingkaran. Dari hasil perhitungan menghasilkan sudut yang bervariasi untuk setiap variasi ukuran dan variasi kedalaman. Dari hasil perhitungan respon diplotkan kedalam sebuah grafik RAO berdasarkan variasi ukuran BC. Pada Gambar 4.1 sampai Gambar 4.3 merupakan hasil dari perhitungan RAO WEC:



Gambar 4.1 Grafik RAO pitch WEC material baja ukuran $D=2m$ $H=3,5m$ $t=10mm$ di 3 variasi kedalaman laut



Gambar 4.2 Grafik RAO pitch WEC material baja ukuran $D=3m$ $H=4,5m$ $t=25mm$ di 3 variasi kedalaman laut

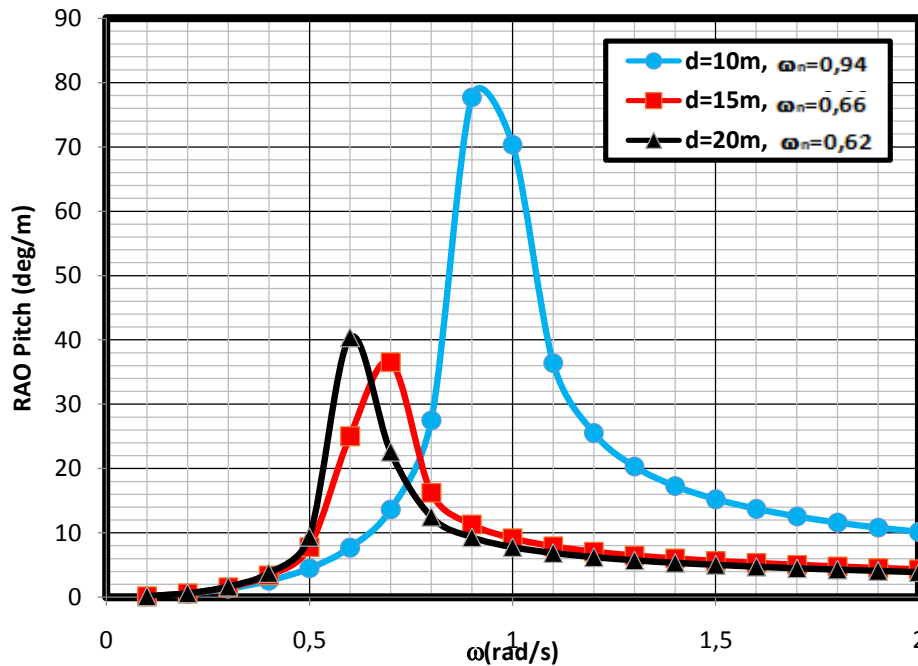


Gambar 4.3 Grafik RAO pitch WEC material baja ukuran $D=4\text{m}$ $H=5,5\text{m}$ $t=30\text{mm}$ di 3 variasi kedalaman laut

Dari grafik respon yang didapatkan dapat dilihat bahwa semakin dalam kedalaman laut untuk WEC maka akan semakin kecil frekuensi natural dari WEC. Respon terbesar dari WEC terjadi pada kedalaman 10m untuk variasi ukuran $D=2\text{m}$ $H=3,5\text{m}$ $t=10\text{mm}$. Dalam kenyataan yang terjadi respon struktur yang didapatkan tidak memasuki daerah gelombang yang sering terjadi karena gelombang yang sering terjadi dalam studi kasus ini yaitu frekuensi 1rad/s sampai 2rad/s . Untuk mencoba mendapatkan struktur yang bisa beroperasi dengan gerakan yang masuk kedalam rentang frekuensi tersebut dikaji penggunaan material struktur alternatif dari baja menjadi fiber. Kajian saat ini dilakukan dalam variasi ukuran $D=2\text{m}$ $H=3,5\text{m}$ $t=10\text{mm}$.

Dari hasil kajian yang dilakukan didapatkan kesimpulan bahwa jika material baja diganti dengan material fiber maka respon struktur yang terjadi pun meningkat dan frekuensi natural struktur juga meningkat mendekati area rentang frekuensi gelombang yang sering terjadi. Hal ini disebabkan karena jika bahan baja diganti dengan fiber maka momen inersia dan kekakuannya akan berubah. Momen inersia akan semakin kecil dan kekakuannya akan semakin besar sehingga menyebabkan frekuensi natural struktur berubah menjadi lebih besar. Perubahan nilai momen inersia dan kekakuan tersebut

disebabkan karena densitas baja dan fiber berbeda jauh. Untuk densitas baja 7850kg/m^3 dan densitas fiber 1552kg/m^3 . Dari hasil perubahan tersebut didapatkan hasil yang diplotkan dalam grafik RAO pada Gambar 4.4 :



Gambar 4.4 Grafik RAO pitch WEC ukuran $D=2\text{m}$ $H=3,5\text{m}$ $t=10\text{mm}$ material fiber di 3 variasi kedalaman laut

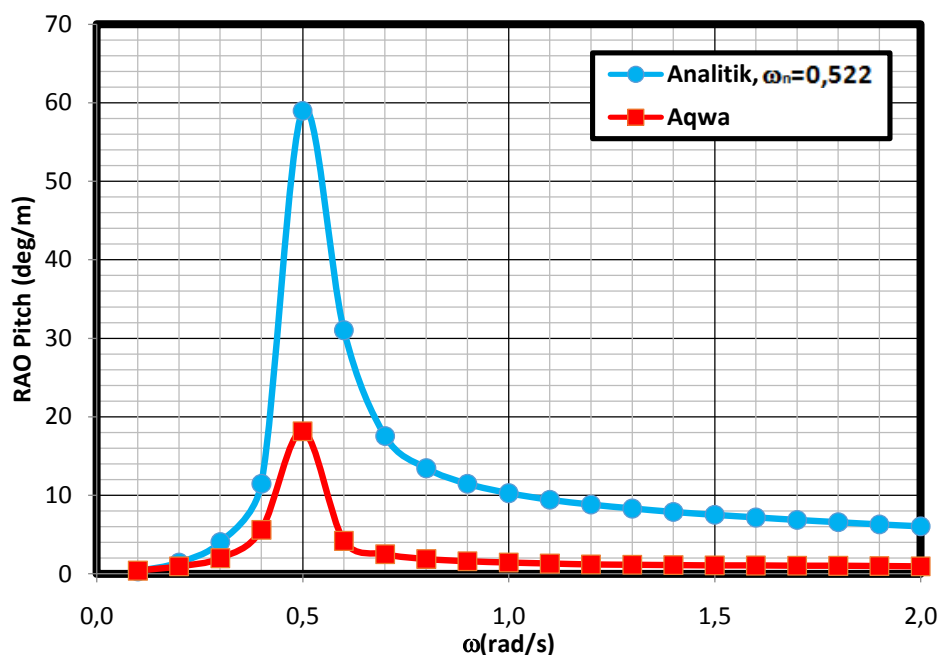
Dari Gambar 4.1 dan Gambar 4.4 dapat dilihat perbandingan RAO dan frekuensi natural cukup meningkat jauh. Pada kedalaman 10m untuk material baja frekuensi natural WEC berada sekitar $0,5\text{rad/s}$ sedangkan pada material fiber frekuensi natural WEC berada sekitar $0,9\text{rad/s}$. Perbedaan yang terjadi sekitar $0,4\text{rad/s}$. Begitu juga untuk variasi kedalaman 15m dan 20m perbedaan yang terjadi antara material baja dan material fiber sekitar $0,4\text{rad/s}$

4.3. ANALISA RAO DENGAN SOFTWARE ANSYS AQWA

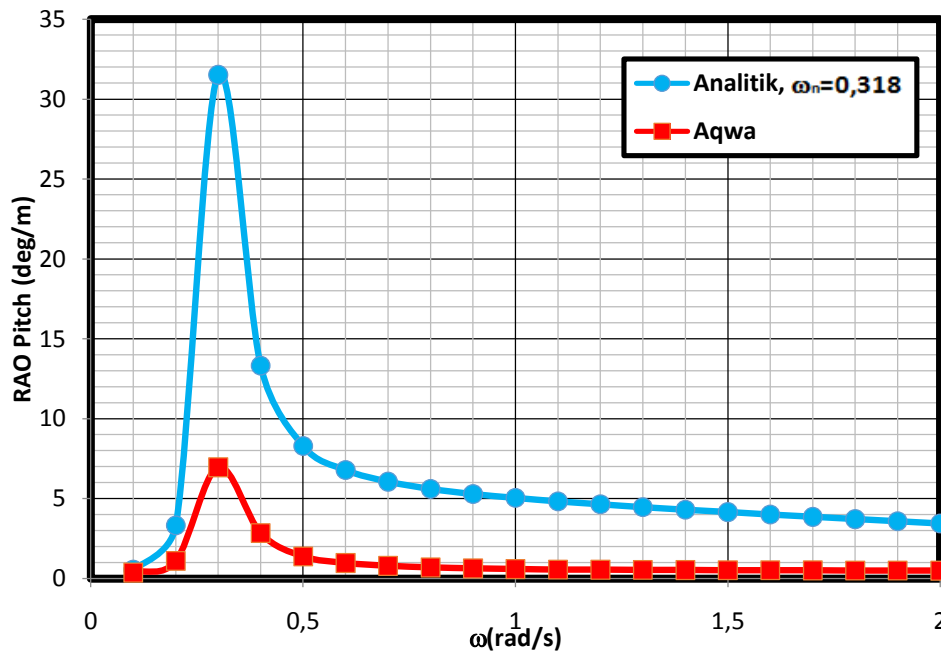
Hasil analisa RAO WEC pada ANSYS Aqwa berbeda dengan hasil analisa secara analitik. Hal ini disebabkan karena adanya beberapa faktor yang dipertimbangkan didalam analitik tidak bisa diinput pada ANSYS Aqwa. Faktor-faktor tersebut yaitu tinggi gelombang ,kekakuan dan *restoring* momen. Faktor-faktor tersebut berpengaruh terhadap besar dan kecil respon yang dihasilkan oleh struktur tersebut.

Analisa di ANSYS Aqwa dilakukan beberapa tahap. Untuk melakukan analisa pada ANSYS Aqwa perlu dilakukan permodelan struktur terlebih dahulu. Permodelan struktur bisa menggunakan berbagai macam *software* bisa menggunakan autocad, solidwork atau *software* lainnya yang mendukung untuk dibuka dalam ANSYS Aqwa, bisa juga dilakukan permodelan langsung pada ANSYS Aqwa sendiri.

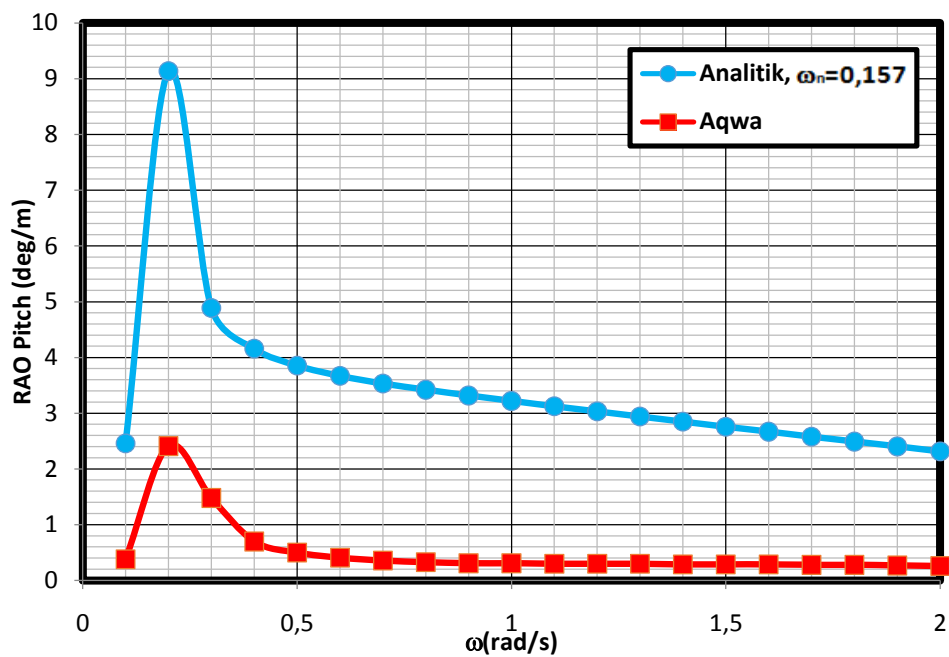
Setelah melakukan permodelan masuk kedalam *setup* model. Pada tahap ini dilakukan penginputan data-data yang diperlukan untuk melakukan analisa. Data – data yang bisa diinputkan yaitu kedalaman air laut, massa struktur, titik berat struktur dan bouyancy, momen inersia, volume bouyanc, arah gelombang, dan frekuensi gelombang. Jika semua data telah diisi lakukan pembagian struktur menjadi elemen – elemen kecil untuk bisa dilakukan analisa. Setelah struktur dibagi menjadi elemen – elemen kecil lakukan analisa pada ANSYS Aqwa. Dari hasil Analisa ANSYS Aqwa didapatkan hasil berupa grafik RAO dan dibandingkan dengan RAO hasil analitik pada Gambar 4.5 sampai Gambar 4.13 :



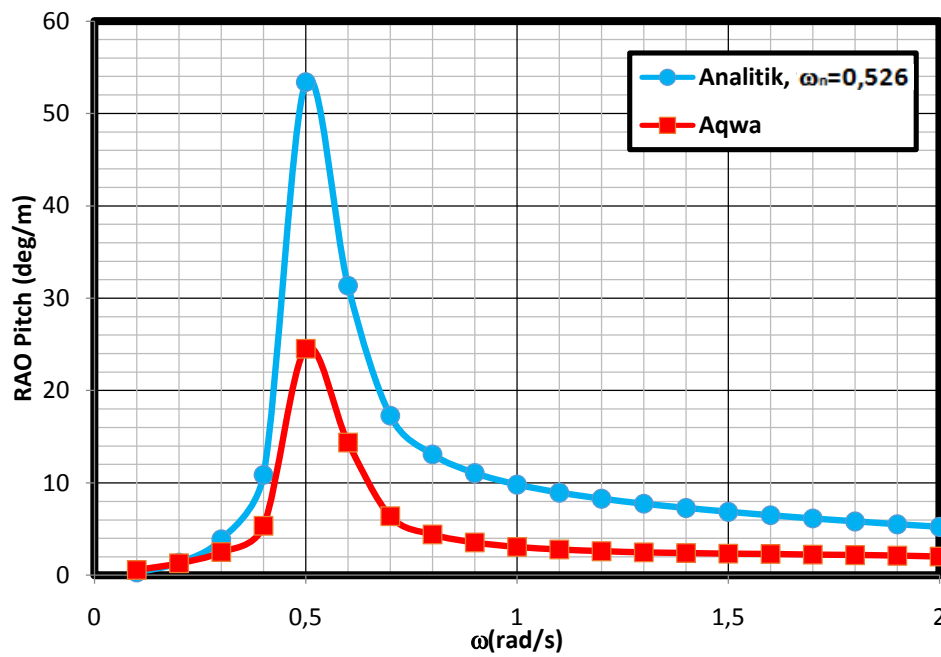
Gambar 4.5 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran D=2m H=3,5m t=10mm kedalaman 10m



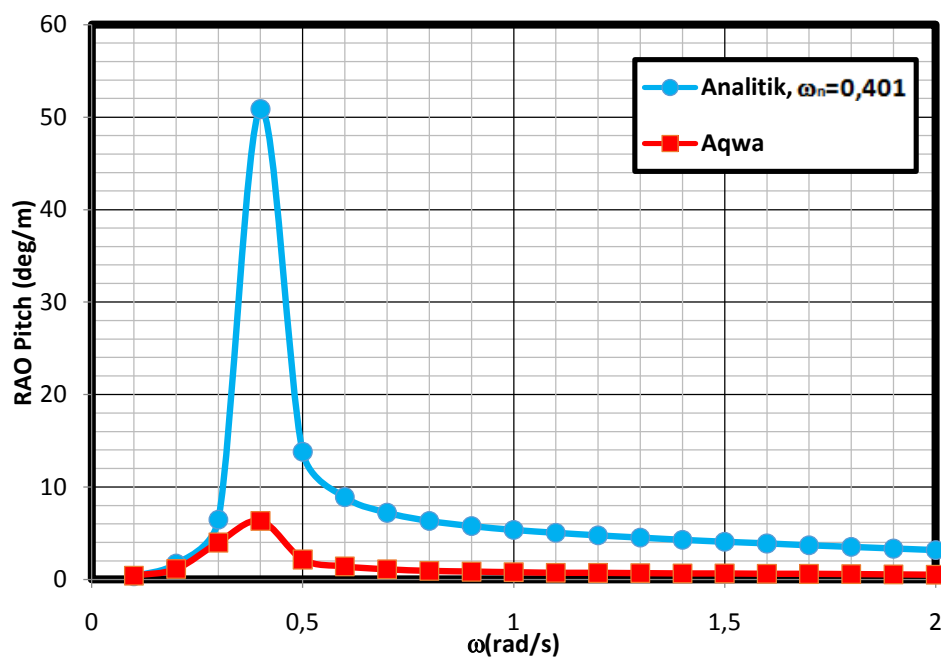
Gambar 4.6 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran D=2m H=3,5m t=10mm kedalaman 15m



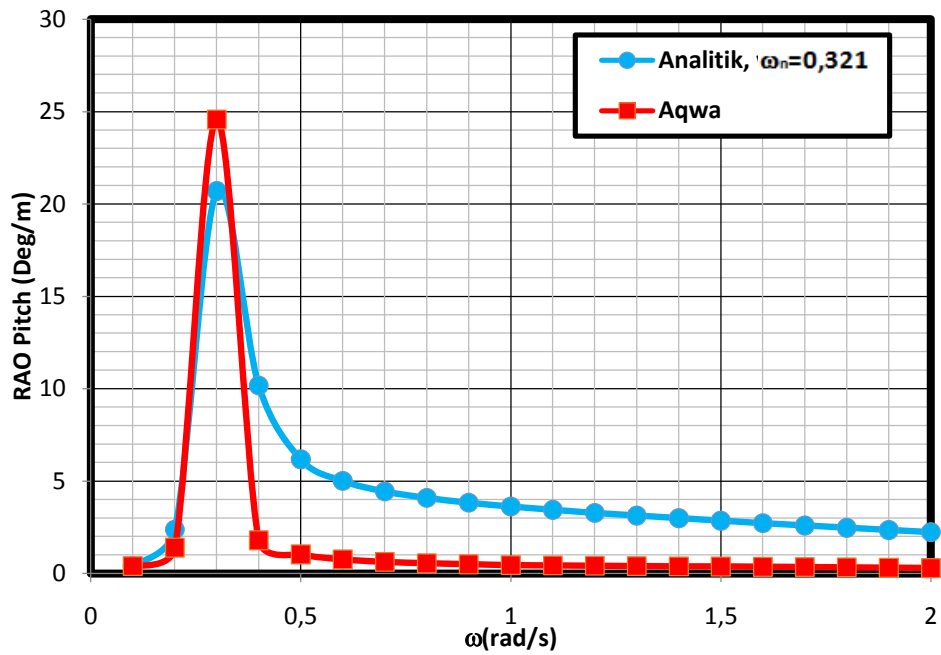
Gambar 4.7 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran D=2m H=3,5m t=10mm kedalaman 20m



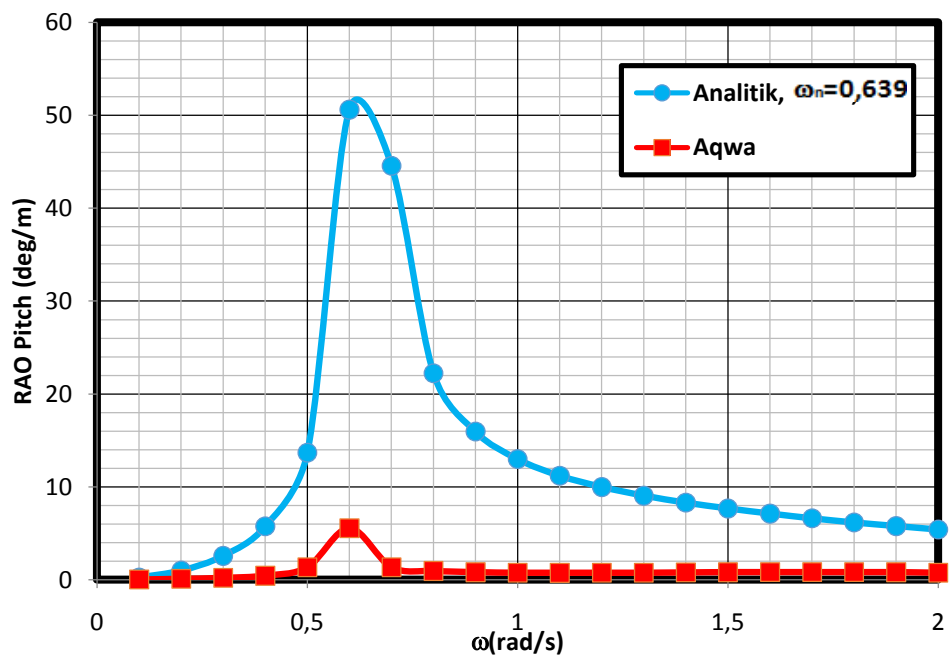
Gambar 4.8 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran D=3m H=4,5m t=25mm kedalaman 10m



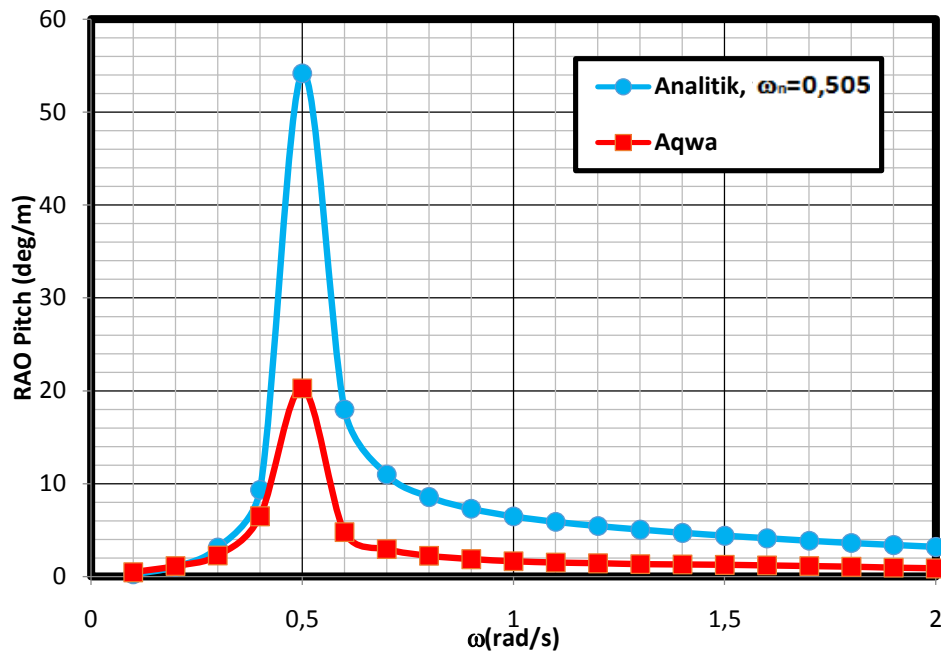
Gambar 4.9 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran D=3m H=4,5m t=25mm kedalaman 15m



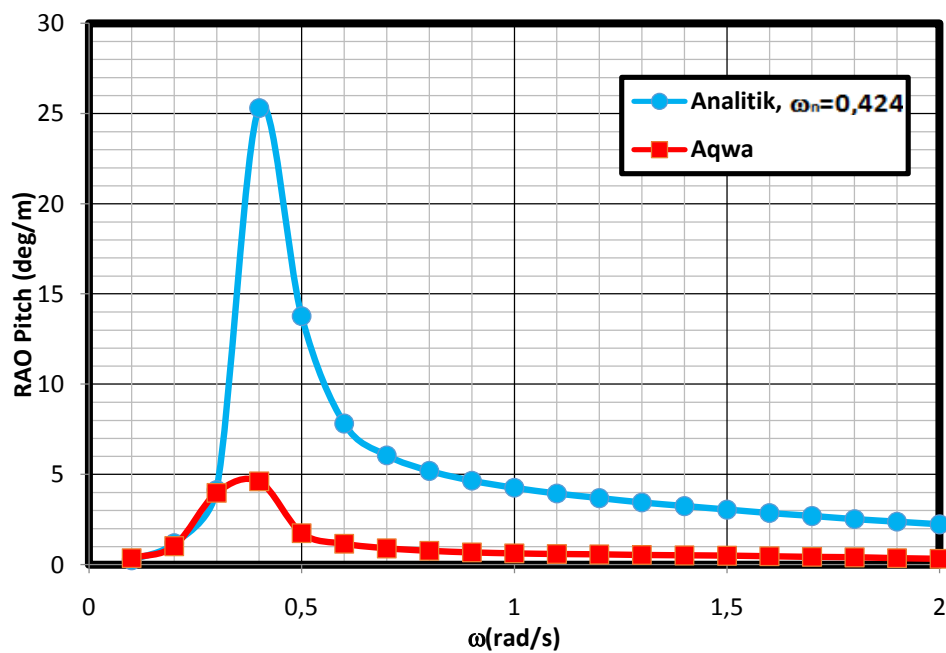
Gambar 4.10 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran $D=3\text{m}$ $H=4.5\text{m}$ $t=25\text{mm}$ kedalaman 20m



Gambar 4.11 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran $D=4\text{m}$ $H=5.5\text{m}$ $t=30\text{mm}$ kedalaman 10m



Gambar 4.12 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran D=4m H=5,5m t=30mm kedalaman 15m



Gambar 4.13 Grafik perbandingan RAO pitch WEC ukuran D=4m H=5,5m t=30mm kedalaman 20m

Hasil analisa RAO dengan software ANSYS Aqwa tidak bisa digunakan untuk menghitung laju air yang keluar dari piston. Karena hasil RAO dari ANSYS Aqwa kurang akurat karena ada faktor yang tidak bisa diinputkan.

4.4. KECEPATAN AIR YANG DIPOMPA OLEH PISTON

Dari respon WEC yang didapatkan didapatkan panjang tabung piston yang akan digunakan sebagai penggerak air menuju ke generator. Dari hasil respon WEC diambil respon yang terbesar yang masuk kedalam zona frekuensi yang sering terjadi untuk menentukan ukuran tabung piston. Posisi piston berada pada posisi 1,5m dibawah permukaan air laut.

Ukuran tabung piston 2x lebih besar dari simpangan yang terjadi. Simpangan yang digunakan untuk desain tabung piston adalah simpangan terbesar yang terjadi pada setiap variasi. Simpangan – simpangan tersebut diambil dari frekuensi gelombang yang sering terjadi yaitu pada frekuensi 1rad/s - 2rad/s. Untuk menentukan ukuran tabung piston yaitu simpangan dikali 2 karena simpangan yang terjadi yaitu 2 arah. Dari hasil perhitungan pada Tabel 4.4 dibawah ini didapatkan simpangan terbesar yang terjadi setiap variasi yang memasuki rentang frekuensi gelombang yang sering terjadi dan ukuran tabung piston.

Tabel 4.4 Besar Ukuran Tabung Piston

Variasi	θ_0 maks (deg)	x_0 (m)	Tabung Piston (m)
D=2m H=3,5m t=10mm d=10m	12,83	1,94	3,88
D=2m H=3,5m t=10mm d=15m	6,32	1,49	2,98
D=2m H=3,5m t=10mm d=20m	4,03	1,30	2,6
D=3m H=4,5m t=25mm d=10m	12,27	1,85	3,7
D=3m H=4,5m t=25mm d=15m	6,71	1,59	3,18
D=3m H=4,5m t=25mm d=20m	4,53	1,47	2,94
D=4m H=5,5m t=30mm d=10m	16,24	2,48	4,96
D=4m H=5,5m t=30mm d=15m	8,11	1,92	3,84
D=4m H=5,5m t=30mm d=20m	5,33	1,73	3,46

Kecepatan air yang keluar dari piston dihitung berdasarkan kecepatan gerakan piston. Untuk menghitung kecepatan piston digunakan persamaan dibawah ini:

$$\dot{\theta}(t) = \omega \theta_0 e^{-kz} \sin(kx - \omega t) \quad (4.1)$$

ω = Frekuensi Gelombang (rad/s)

θ_0 = Respon Struktur (rad)

Dari persamaan tersebut θ_0 diubah menjadi dalam bentuk satuan panjang agar kecepatan struktur yang didapatkan langsung sama dengan kecepatan air yang keluar. Sehingga persamaan di atas berubah menjadi :

Dari persamaan tersebut didapatkan hasil:

$$\dot{x}(t) = \omega x_0 e^{-kz} \sin(kx - \omega t) \quad (4.2)$$

x_0 = Simpangan (m)

\dot{x} = Kecepatan Piston (m/s)

Dari persamaan tersebut dilakukan perhitungan simpangan, kecepatan piston, debit, kecepatan maksimum yang keluar dari piston dan kecepatan rata-rata air yang keluar dari piston. Pada Tabel 4.5 merupakan hasil perhitungan kecepatan laju air :

Tabel 4.5 Kecepatan laju air

Variasi	θ_0 (deg)	x_0 (m)	\dot{x} piston maks (m/s)	Debit maks Q(m ³ /s)	v_x outlet maks (m/s)	v_x rata-rata (m/s)
D=2m H=3,5m t=10mm d=10m	12,83	1,94	1,94	0,380	193,62	111,14
D=2m H=3,5m t=10mm d=15m	6,32	1,49	1,49	0,293	149,43	85,77
D=2m H=3,5m t=10mm d=20m	4,02	1,30	1,30	0,256	130,17	74,71
D=3m H=4,5m t=25mm d=10m	12,27	1,85	1,85	0,363	184,93	106,15
D=3m H=4,5m t=25mm d=15m	6,71	1,59	1,59	0,312	158,84	91,17
D=3m H=4,5m t=25mm d=20m	4,53	1,47	1,47	0,288	146,60	84,14
D=4m H=5,5m t=30mm d=10m	16,24	2,48	2,48	0,486	247,62	142,13
D=4m H=5,5m t=30mm d=15m	8,11	1,92	1,92	0,378	192,48	110,48
D=4m H=5,5m t=30mm d=20m	5,33	1,73	1,73	0,339	172,56	99,05

Perhitungan laju air pada Tabel 4.5 diawali dengan mengkonversi sudut respon wec menjadi simpangan dengan satuan panjang. Setelah mendapatkan simpangan yang terjadi pada posisi kedalam 1,5m dibawah permukaan air dihitung kecepatan piston dengan rumus yang telah dikonversi. Setelah itu dilakukan perhitungan debit air pada piston. Untuk menghitung debit penampang piston yang digunakan diameter 50cm. Outlet piston memiliki diameter yang lebih kecil sehingga akan menghasilkan kecepatan air yang lebih besar dari kecepatan gerak piston. Dari Tabel 4.5 kecepatan outlet air terbesar terjadi pada variasi $D=4m$ $H=4,5m$ $t=25mm$ $d=10$ untuk v_x maks 247,62m/s dan v_x rata – rata 142,13m/s sedangkan kecepatan outlet terendah terjadi pada variasi $D=2m$ $H=3,5m$ $t=10mm$ $d=10m$ untuk v_x maks 130,17m/s dan v_x rata – rata 74,71m/s. Perhitungan kecepatan air yang dilakukan belum mempertimbangkan loses yang terjadi selama air bergerak dari dalam piston menuju keluar.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

Dari analisa yang telah dilakukan dalam penelitian tugas akhir ini dalam diambil kesimpulan yaitu:

1. Respon Gerak struktur bervariasi tergantung dari ukuran dan kedalaman tempat struktur akan diletakan. Respon terbesar yang terjadi pada variasi diameter 2m tinggi bouyancy chamber 3,5m dan tebal bouyancy chamber 10mm yaitu $58,97^{\circ}/m$ untuk kedalaman 10m, $31,52^{\circ}/m$ untuk kedalaman 15m, dan $9,14^{\circ}/m$ untuk kedalaman 20m. Untuk variasi diameter 3m tinggi bouyancy chamber 4,5m dan tebal bouyancy chamber 25mm yaitu $53,41^{\circ}/m$ untuk kedalaman 10m, $50,87^{\circ}/m$ untuk kedalaman 15m, dan $20,7^{\circ}/m$ untuk kedalaman 20m. Diameter 4m tinggi bouyancy chamber 5,5m dan tebal bouyancy chamber 30mm yaitu $50,6^{\circ}/m$ untuk kedalaman 10m, $54,17^{\circ}/m$ untuk kedalaman 15m, dan $25,31^{\circ}/m$ untuk kedalaman 20m.
2. Simpangan terbesar terjadi pada variasi diameter 4m pada kedalaman 10m yaitu sebesar 2,48m. kecepatan outlet air terbesar terjadi pada variasi $D=4m$ $H=5,5m$ $t=25mm$ $d=10m$ untuk v_x maks $247,62m/s$ dan v_x rata – rata $142,13m/s$ sedangkan kecepatan outlet terendah terjadi pada variasi $D=2m$ $H=3,5m$ $t=10mm$ $d=20m$ untuk v_x maks $130,17m/s$ dan v_x rata – rata $74,71m/s$. Perhitungan kecepatan air yang dilakukan belum mempertimbangkan loses yang terjadi selama air bergerak dari dalam piston menuju keluar.

5.2. SARAN

Dari hasil penelitian yang telah didapatkan masih perlu dilakukan penyempurnaan lagi sehingga saran untuk penelitian selanjutnya yaitu:

1. Mempertimbangkan kekuatan struktur dalam analisa agar struktur yang dianalisa kelak bisa direalisasikan dalam bentuk nyata.
2. Untuk aliran air yang keluar dari piston perlu penelitian lebih lanjut tentang cara kerja piston.

3. Melakukan studi lebih lanjut tentang material untuk membangun *wave energy converter*.

DAFTAR PUSTAKA

- Bjorn, W. 2017. *Principles of Wave Energy*. Vigourtech Ltd, Malta.
- Chakrabarti, S.K. 1987. *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Computational Mechanics Publications Southampton Boston, Springer-Verlag, Berlin
- Djarmiko, E. B. 2012. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut Di Atas Gelombang Acak*. Itspress, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Djarmiko, E. B. 2014. "Gaya Gelombang Pada Struktur Langsing Terpancang". *Materi Kuliah Hidrodinamika I*. Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Djarmiko, E. B. 2016. "Hydrodynamic Analysis On Articulated Tower". *Materi Kuliah Program Pasca Sarjana Teknologi Kelautan*. Surabaya.
- Dmitri, J. 2010. "Wave Energy Converter Performance Modeling and Cost of Electricity Assessment". *Thesis*. The Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo.
- Eky, A.N., Arief, I.S. dan Musriyadi, T.B. 2013. "Penerapan Sistem Pendulum Angguk Untuk Pengembangan Energi Gelombang Laut". *Jurnal Teknik Sistem Perkapalan vol.1, No.1*. Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Jayashankar, V dkk. 2011. "Design of a 100 GWh Wave Energy Plant". *World Renewable Energy Congress*. Linkoping, Sweden.
- Lé Méhauté, B. 1976. *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*. Springer Verlag, Berlin
- MHL. 2015. "Wave Data Analysis And Statistics". MHL, NSW Goverment. Diakses pada 15 Februari 2017 dari <http://new.mhl.nsw.gov.au/data/realtime/wave/AnalysisAndStatistics>.
- Rahman, Md.M. dkk. 2013. "Power Generation From Sea Wave : An Approach to Create Renewable Energy". *Global Journal of Researches in Engineering*. Global Journal Inc, USA.
- SPM. 1984. "Shore Manual Protection Vol 1". Departemen of The Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

- Supangat, A dan Susanna. 2007. *Pengantar Oseanografi*. Departemen Kelautan dan Perikanan, Badan Riset Kelautan dan Perikanan, Pusat Riset Wilayah Laut dan Sumberdaya Non-Hayati.
- Utami, S. R. 2010. “Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Dengan Menggunakan Sistem *Oscilating Water Column* (OWC) Di Tiga Puluh Wilayah Kelautan Indonesia”. *Tugas Akhir*. Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok.
- Winawang, G. 2014. “Pemanfaatan Gelombang Laut di Selatan Jawa Sebagai Sumber Pembangkit Energi Listrik Dengan Sistem Bandul”. *Tugas Akhir*. Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta.

LAMPIRAN A
PERHITUNGAN MASSA *WAVE ENERGY CONVERTER*

Variasi D=2m H=3,5m t=10mm d=10m

tb	Dbo	Hbo	Dbi	Hbi	
0,01	2	3,5	1,98	3,48	
struktur					
vo	vi	val+Vat	Vtot		
10,93274243	10,71518	0,062832	0,280393		
mstruktur					
2201,088406					
bouyancy					
tb	Dbo	Hba	Hbt	Dbi(a/t)	Hbi
0,01	2	3,5	2	1,98	3,48
Mbou					
6440,26494					
added mass					
vo					
6,283185307					
mass					
3992,964263					
Bouyancy Chamber					
tl	Dlo	Hb	Dli		
0,1	0,3	7,9	0,1		
struktur					
vo	vi	vtot	val		
0,558418094	0,062046	0,50344	0,007069		
mstruktur					
3952,005748					
bouyancy					
mbou					
579,6238446					
added mass					
madd					
579,6238446					
Leg					

Variasi D=2m H=3,5m t=10mm d=15m

tb	Dbo	Hbo	Dbi	Hbi	
0,01	2	3,5	1,98	3,48	
Struktur					

vo	vi	val+Vat	Vtot		
10,93274243	10,71518	0,062832	0,280393		
mstruktur					
2201,088406					
Bouyancy					
tb	Dbo	Hba	Hbt	Dbi(a/t)	Hbi
0,01	2	3,5	2	1,98	3,48
Mbou					
6440,26494					
added mass					
vo					
6,283185307					
mass					
3992,964263					
Bouyancy Chamber					
tl	Dlo	Hb	Dli		
0,1	0,3	12,9	0,1		
struktur					
vo	vi	vtot	val		
0,911847268	0,101316	0,817599	0,007069		
mstruktur					
6418,155982					
bouyancy					
mbou					
941,8887475					
added mass					
madd					
941,8887475					
Leg					

Variasi D=2m H=3,5m t=10mm d=20m

tb	Dbo	Hbo	Dbi	Hbi	
0,01	2	3,5	1,98	3,48	
Struktur					
vo	vi	val+Vat	Vtot		
10,93274243	10,71518	0,062832	0,280393		
mstruktur					
2201,088406					
Bouyancy					
tb	Dbo	Hba	Hbt	Dbi(a/t)	Hbi
0,01	2	3,5	2	1,98	3,48
Mbou					
6440,26494					
added mass					

vo					
6,283185307					
mass					
3992,964263					
Bouyancy Chamber					
tl	Dlo	Hb	Dli		
0,1	0,3	17,9	0,1		
struktur					
vo	vi	vtot	val		
1,265276441	0,140586	1,131759	0,007069		
mstruktur					
8884,306215					
bouyancy					
mbou					
1304,15365					
added mass					
madd					
1304,15365					
Leg					

Variasi D=3m H=4,5m t=25mm d=10m

tb	Dbo	Hbo	Dbi	Hbi	
0,025	3	4,5	2,95	4,45	
Struktur					
vo	vi	val+Vat	Vtot		
31,45519644	30,41543	0,353429	1,393198		
mstruktur					
10936,60561					
Bouyancy					
tb	Dbo	Hba	Hbt	Dbi(a/t)	Hbi
0,025	3	4,5	3	2,95	4,45
Mbou					
21735,89417					
added mass					
vo					
21,20575041					
mass					
13476,25439					
Bouyancy Chamber					
tl	Dlo	Hb	Dli		
0,1	0,3	6,9	0,1		
struktur					
vo	vi	vtot			
0,487732259	0,054192	0,440608	0,007069		

mstruktur			
3458,775702			
bouyancy			
mbou			
507,170864			
added mass			
madd			
507,170864			
Leg			

Variasi D=3m H=4,5m t=25mm d=15m

tb	Dbo	Hbo	Dbi	Hbi	
0,025	3	4,5	2,95	4,45	
Struktur					
vo	vi	val+Vat	Vtot		
31,45519644	30,41543	0,353429	1,393198		
mstruktur					
10936,60561					
Bouyancy					
tb	Dbo	Hba	Hbt	Dbi(a/t)	Hbi
0,025	3	4,5	3	2,95	4,45
Mbou					
21735,89417					
added mass					
vo					
21,20575041					
mass					
13476,25439					
Bouyancy Chamber					
tl	Dlo	Hb	Dli		
0,1	0,3	11,9	0,1		
struktur					
vo	vi	vtot			
0,841161433	0,093462	0,754768	0,007069		
mstruktur					
5924,925935					
bouyancy					
mbou					
869,4357669					
added mass					
madd					
869,4357669					
Leg					

Variasi D=3m H=4,5m t=25mm d=20m

tb	Dbo	Hbo	Dbi	Hbi	
0,025	3	4,5	2,95	4,45	
Struktur					
vo	vi	val+Vat	Vtot		
31,45519644	30,41543	0,353429	1,393198		
mstruktur					
10936,60561					
Bouyancy					
tb	Dbo	Hba	Hbt	Dbi(a/t)	Hbi
0,025	3	4,5	3	2,95	4,45
Mbou					
21735,89417					
added mass					
vo					
21,20575041					
mass					
13476,25439					
Bouyancy Chamber					
tl	Dlo	Hb	Dli		
0,1	0,3	16,9	0,1		
struktur					
vo	vi	vtot			
1,194590607	0,132732	1,068927	0,007069		
mstruktur					
8391,076168					
bouyancy					
mbou					
1231,70067					
added mass					
madd					
1231,70067					
Leg					

Variasi D=4m H=5,5m t=30mm d=10m

tb	Dbo	Hbo	Dbi	Hbi	
0,03	4	5,5	3,94	5,44	
struktur					
vo	vi	val+Vat	Vtot		
68,36105614	66,32561	0,753982	2,789433		
mstruktur					
21897,04657					
bouyancy					

tb	Dbo	Hba	Hbt	Dbi(a/t)	Hbi
0,03	4	5,5	4	3,94	5,44
Mbou					
51522,11952					
added mass					
vo					
50,26548246					
mass					
31943,7141					
Bouyancy Chamber					
tl	Dlo	Hb	Dli		
0,1	0,3	5,9	0,1		
struktur					
vo	vi	vtot			
0,417046425	0,046338	0,377777	0,007069		
mstruktur					
2965,545655					
bouyancy					
mbou					
434,7178834					
added mass					
madd					
434,7178834					
Leg					

Variasi D=4m H=5,5m t=30mm d=15m

tb	Dbo	Hbo	Dbi	Hbi	
0,03	4	5,5	3,94	5,44	
struktur					
vo	vi	val+Vat	Vtot		
68,36105614	66,32561	0,753982	2,789433		
mstruktur					
21897,04657					
bouyancy					
tb	Dbo	Hba	Hbt	Dbi(a/t)	Hbi
0,03	4	5,5	4	3,94	5,44
Mbou					
51522,11952					
added mass					
vo					
50,26548246					
mass					
31943,7141					
Bouyancy Chamber					

tl	Dlo	Hb	Dli
0,1	0,3	10,9	0,1
struktur			
vo	vi	vtot	
0,770475598	0,085608	0,691936	0,007069
mstruktur			
5431,695888			
bouyancy			
mbou			
796,9827863			
added mass			
madd			
796,9827863			
Leg			

Variasi D=4m H=5,5m t=30mm d=20m

tb	Dbo	Hbo	Dbi	Hbi	
0,03	4	5,5	3,94	5,44	
struktur					
vo	vi	val+Vat	Vtot		
68,36105614	66,32561	0,753982	2,789433		
mstruktur					
21897,04657					
bouyancy					
tb	Dbo	Hba	Hbt	Dbi(a/t)	Hbi
0,03	4	5,5	4	3,94	5,44
Mbou					
51522,11952					
added mass					
vo					
50,26548246					
mass					
31943,7141					
Bouyancy Chamber					
tl	Dlo	Hb	Dli		
0,1	0,3	15,9	0,1		
struktur					
vo	vi	vtot			
1,123904772	0,124878	1,006095	0,007069		
mstruktur					
7897,846121					
bouyancy					
mbou					
1159,247689					

added mass			
madd			
1159,247689			
Leg			

Hbou (m)	Hleg (m)	Zbou (m)	Zleg (m)	mbou chamber(kg)	mbou leg(kg)	mstruk cham(kg)	mstruk leg(kg)	zbou total(m)	Zstruktur(m)	Kq(N/m)
3,50	18,00	19,75	9,00	6440,26	1304,15	2201,09	8884,31	17,32	11,13	104587,21
Kekakuan										

K	I+Ia	Wn
104587,21	4252031,27	0,16
Frekuensi Natural		

Variasi D=3m H=4,5m t=25mm d=10m

Bouyancy Chamber		Leg		massa BC		Massa Leg		tinggi		Inersia(z)		
Ro	Ri	Ro	Ri	M struktur	Madd	M struktur	Madd	BC	Leg	I	Ia	I+Ia
1,50	1,48	0,15	0,05	10936,61	13476,25	3458,78	507,17	4,50	7,00	1022834,12	1576631,20	2599465,32
Inersia												

Hbou (m)	Hleg (m)	Zbou (m)	Zleg (m)	mbou chamber(kg)	mbou leg(kg)	mstruk cham(kg)	mstruk leg(kg)	zbou total(m)	Zstruktur(m)	Kq(N/m)
4,50	7,00	9,25	3,50	21735,89	507,17	10936,61	3458,78	8,39	7,87	717956,64
Kekakuan										

K	I+Ia	Wn
717956,64	2599465,32	0,53
Frekuensi Natural		

Variasi D=3m H=4,5m t=25mm d=15m

Bouyancy Chamber		Leg		massa BC		Massa Leg		tinggi		Inersia(z)		
Ro	Ri	Ro	Ri	M struktur	Madd	M struktur	Madd	BC	Leg	I	Ia	I+Ia
1,50	1,48	0,15	0,05	10936,61	13476,25	5924,93	869,44	4,50	12,00	2535803,80	3992666,40	6528470,20
Inersia												

Hbou (m)	Hleg (m)	Zbou (m)	Zleg (m)	mbou chamber(kg)	mbou leg(kg)	mstruk cham(kg)	mstruk leg(kg)	zbou total(m)	Z struktur(m)	Kq(N/m)
4,50	12,00	14,25	6,00	21735,89	869,44	10936,61	5924,93	13,21	11,35	1051099,00
Kekakuan										

K	I+Ia	Wn
1051099,00	6528470,20	0,40
Frekuensi Natural		

Variasi D=3m H=4,5m t=25mm d=20m

Bouyancy	Leg	massa BC	Massa Leg	tinggi	Inersia(z)
----------	-----	----------	-----------	--------	------------

K	I+Ia	Wn
3363479,97	13188710,56	0,51
Frekuensi Natural		

Variasi D=4m H=5,5m t=30mm d=20m

Bouyancy Chamber		Leg		massa BC		Massa Leg		tinggi		Inersia(z)		
Ro	Ri	Ro	Ri	M struktur	Madd	M struktur	Madd	BC	Leg	I	Ia	I+Ia
2,00	1,97	0,15	0,05	21897,05	31943,71	7897,85	1159,25	5,50	16,00	8470520,24	16767358,58	25237878,82
Inersia												

Hbou (m)	Hleg (m)	Zbou (m)	Zleg (m)	mbou chamber(kg)	mbou leg(kg)	mstruk cham(kg)	mstruk leg(kg)	zbou total(m)	Zstruktur(m)	Kq(N/m)
5,50	16,00	18,75	8,00	51522,12	1159,25	21897,05	7897,85	17,78	15,90	4536613,46
Kekakuan										

K	I+Ia	Wn
4536613,46	25237878,82	0,42
Frekuensi Natural		

LAMPIRAN C

PERHITUNGAN RESPON WEC

Respon WEC ukuran D=2m H=3,5m t=10mm kedalaman 10m

Wn	w	Mmax	K	Cf	Respon (rad)	degree	A (m)	RAO (rad/m)	RAO (degree/m)
0,522	0,1	1,505	225,520	0,05	0,007	0,397	1,25	0,006	0,318
0,522	0,2	6,001	225,520	0,05	0,031	1,785	1,25	0,025	1,428
0,522	0,3	13,427	225,520	0,05	0,089	5,076	1,25	0,071	4,060
0,522	0,4	23,685	225,520	0,05	0,250	14,336	1,25	0,200	11,469
0,522	0,5	36,640	225,520	0,05	1,286	73,711	1,25	1,029	58,969
0,522	0,6	52,129	225,520	0,05	0,677	38,789	1,25	0,542	31,031
0,522	0,7	69,957	225,520	0,05	0,383	21,945	1,25	0,306	17,556
0,522	0,8	89,911	225,520	0,05	0,294	16,821	1,25	0,235	13,457
0,522	0,9	111,757	225,520	0,05	0,250	14,333	1,25	0,200	11,467
0,522	1,0	135,251	225,520	0,05	0,224	12,833	1,25	0,179	10,266
0,522	1,1	160,140	225,520	0,05	0,206	11,799	1,25	0,165	9,439
0,522	1,2	186,169	225,520	0,05	0,192	11,020	1,25	0,154	8,816
0,522	1,3	213,083	225,520	0,05	0,181	10,391	1,25	0,145	8,313
0,522	1,4	240,633	225,520	0,05	0,172	9,860	1,25	0,138	7,888
0,522	1,5	268,578	225,520	0,05	0,164	9,392	1,25	0,131	7,514
0,522	1,6	296,686	225,520	0,05	0,157	8,970	1,25	0,125	7,176
0,522	1,7	324,741	225,520	0,05	0,150	8,581	1,25	0,120	6,865
0,522	1,8	352,542	225,520	0,05	0,143	8,218	1,25	0,115	6,574
0,522	1,9	379,905	225,520	0,05	0,137	7,875	1,25	0,110	6,300
0,522	2,0	406,663	225,520	0,05	0,132	7,548	1,25	0,105	6,038

Respon WEC ukuran D=2m H=3,5m t=10mm kedalaman 15m

Wn	w	Mmax	K	Cf	Respon (rad)	degree	A(m)	RAO (rad/m)	RAO (degree/m)
0,318	0,1	2,404	216,599	0,05	0,012	0,705	1,25	0,010	0,564
0,318	0,2	9,577	216,599	0,05	0,073	4,174	1,25	0,058	3,339
0,318	0,3	21,407	216,599	0,05	0,688	39,399	1,25	0,550	31,519
0,318	0,4	37,709	216,599	0,05	0,291	16,665	1,25	0,233	13,332
0,318	0,5	58,240	216,599	0,05	0,181	10,373	1,25	0,145	8,299
0,318	0,6	82,704	216,599	0,05	0,148	8,501	1,25	0,119	6,801
0,318	0,7	110,766	216,599	0,05	0,132	7,589	1,25	0,106	6,071
0,318	0,8	142,063	216,599	0,05	0,123	7,029	1,25	0,098	5,623
0,318	0,9	176,210	216,599	0,05	0,116	6,630	1,25	0,093	5,304
0,318	1	212,813	216,599	0,05	0,110	6,316	1,25	0,088	5,053
0,318	1,1	251,475	216,599	0,05	0,106	6,051	1,25	0,084	4,841
0,318	1,2	291,801	216,599	0,05	0,102	5,816	1,25	0,081	4,653
0,318	1,3	333,403	216,599	0,05	0,098	5,600	1,25	0,078	4,480

0,318	1,4	375,902	216,599	0,05	0,094	5,397	1,25	0,075	4,318
0,318	1,5	418,935	216,599	0,05	0,091	5,204	1,25	0,073	4,163
0,318	1,6	462,154	216,599	0,05	0,088	5,017	1,25	0,070	4,014
0,318	1,7	505,232	216,599	0,05	0,084	4,836	1,25	0,068	3,869
0,318	1,8	547,865	216,599	0,05	0,081	4,659	1,25	0,065	3,727
0,318	1,9	589,772	216,599	0,05	0,078	4,487	1,25	0,063	3,589
0,318	2	630,701	216,599	0,05	0,075	4,318	1,25	0,060	3,455

Respon WEC ukuran D=2m H=3,5m t=10mm kedalaman 20m

Wn	w	Mmax	K	Cf	Respon (rad)	degree	A (m)	RAO (rad/m)	RAO (degree/m)
0,157	0,1	3,347	104,587	0,05	0,054	3,072	1,25	0,043	2,458
0,157	0,2	13,324	104,587	0,05	0,199	11,422	1,25	0,159	9,137
0,157	0,3	29,741	104,587	0,05	0,107	6,112	1,25	0,085	4,889
0,157	0,4	52,301	104,587	0,05	0,091	5,199	1,25	0,073	4,159
0,157	0,5	80,613	104,587	0,05	0,084	4,816	1,25	0,067	3,853
0,157	0,6	114,222	104,587	0,05	0,080	4,587	1,25	0,064	3,670
0,157	0,7	152,630	104,587	0,05	0,077	4,418	1,25	0,062	3,534
0,157	0,8	195,314	104,587	0,05	0,075	4,276	1,25	0,060	3,421
0,157	0,9	241,740	104,587	0,05	0,072	4,147	1,25	0,058	3,317
0,157	1	291,378	104,587	0,05	0,070	4,025	1,25	0,056	3,220
0,157	1,1	343,699	104,587	0,05	0,068	3,907	1,25	0,055	3,125
0,157	1,2	398,188	104,587	0,05	0,066	3,790	1,25	0,053	3,032
0,157	1,3	454,337	104,587	0,05	0,064	3,676	1,25	0,051	2,941
0,157	1,4	511,652	104,587	0,05	0,062	3,562	1,25	0,050	2,850
0,157	1,5	569,656	104,587	0,05	0,060	3,449	1,25	0,048	2,759
0,157	1,6	627,888	104,587	0,05	0,058	3,337	1,25	0,047	2,670
0,157	1,7	685,911	104,587	0,05	0,056	3,225	1,25	0,045	2,580
0,157	1,8	743,317	104,587	0,05	0,054	3,115	1,25	0,043	2,492
0,157	1,9	799,725	104,587	0,05	0,052	3,005	1,25	0,042	2,404
0,157	2	854,794	104,587	0,05	0,051	2,897	1,25	0,040	2,318

Respon WEC ukuran D=3m H=4,5m t=25mm kedalaman 10m

Wn	w	Mmax	K	Cf	Respon (rad)	degree	A (m)	RAO (rad/m)	RAO (degree/m)
0,526	0,1	4,656	717,957	0,05	0,007	0,385	1,25	0,005	0,308
0,526	0,2	18,543	717,957	0,05	0,030	1,729	1,25	0,024	1,383
0,526	0,3	41,417	717,957	0,05	0,085	4,885	1,25	0,068	3,908
0,526	0,4	72,878	717,957	0,05	0,237	13,604	1,25	0,190	10,883
0,526	0,5	112,388	717,957	0,05	1,165	66,766	1,25	0,932	53,412
0,526	0,6	159,280	717,957	0,05	0,684	39,208	1,25	0,547	31,366
0,526	0,7	212,782	717,957	0,05	0,377	21,618	1,25	0,302	17,295
0,526	0,8	272,041	717,957	0,05	0,286	16,373	1,25	0,229	13,098

0,526	0,9	336,140	717,957	0,05	0,241	13,825	1,25	0,193	11,060
0,526	1	404,130	717,957	0,05	0,214	12,274	1,25	0,171	9,819
0,526	1,1	475,049	717,957	0,05	0,195	11,192	1,25	0,156	8,953
0,526	1,2	547,945	717,957	0,05	0,181	10,362	1,25	0,145	8,290
0,526	1,3	621,900	717,957	0,05	0,169	9,684	1,25	0,135	7,747
0,526	1,4	696,043	717,957	0,05	0,159	9,103	1,25	0,127	7,282
0,526	1,5	769,573	717,957	0,05	0,150	8,587	1,25	0,120	6,870
0,526	1,6	841,763	717,957	0,05	0,142	8,118	1,25	0,113	6,495
0,526	1,7	911,977	717,957	0,05	0,134	7,686	1,25	0,107	6,149
0,526	1,8	979,669	717,957	0,05	0,127	7,282	1,25	0,102	5,826
0,526	1,9	1044,390	717,957	0,05	0,120	6,902	1,25	0,096	5,521
0,526	2	1105,788	717,957	0,05	0,114	6,543	1,25	0,091	5,234

Respon WEC ukuran D=3m H=4,5m t=25mm kedalaman 15m

Wn	w	Mmax	K	Cf	Respon (rad)	degree	A (m)	RAO (rad/m)	RAO (degree/m)
0,401	0,1	7,455	1051,099	0,05	0,008	0,433	1,25	0,006	0,346
0,401	0,2	29,678	1051,099	0,05	0,037	2,148	1,25	0,030	1,718
0,401	0,3	66,257	1051,099	0,05	0,141	8,075	1,25	0,113	6,460
0,401	0,4	116,516	1051,099	0,05	1,110	63,588	1,25	0,888	50,870
0,401	0,5	179,546	1051,099	0,05	0,301	17,272	1,25	0,241	13,818
0,401	0,6	254,234	1051,099	0,05	0,194	11,131	1,25	0,155	8,905
0,401	0,7	339,297	1051,099	0,05	0,157	9,018	1,25	0,126	7,215
0,401	0,8	433,327	1051,099	0,05	0,138	7,922	1,25	0,111	6,337
0,401	0,9	534,825	1051,099	0,05	0,126	7,221	1,25	0,101	5,777
0,401	1	642,248	1051,099	0,05	0,117	6,711	1,25	0,094	5,368
0,401	1,1	754,042	1051,099	0,05	0,110	6,303	1,25	0,088	5,042
0,401	1,2	868,683	1051,099	0,05	0,104	5,957	1,25	0,083	4,765
0,401	1,3	984,703	1051,099	0,05	0,099	5,649	1,25	0,079	4,519
0,401	1,4	1100,723	1051,099	0,05	0,094	5,367	1,25	0,075	4,294
0,401	1,5	1215,473	1051,099	0,05	0,089	5,104	1,25	0,071	4,083
0,401	1,6	1327,811	1051,099	0,05	0,085	4,856	1,25	0,068	3,885
0,401	1,7	1436,738	1051,099	0,05	0,081	4,619	1,25	0,064	3,695
0,401	1,8	1541,407	1051,099	0,05	0,077	4,392	1,25	0,061	3,514
0,401	1,9	1641,122	1051,099	0,05	0,073	4,175	1,25	0,058	3,340
0,401	2	1735,345	1051,099	0,05	0,069	3,966	1,25	0,055	3,173

Respon WEC ukuran D=3m H=4,5m t=25mm kedalaman 20m

Wn	w	Mmax	K	Cf	Respon (rad)	degree	A (m)	RAO (rad/m)	RAO (degree/m)
0,321	0,1	10,297	1281,151	0,05	0,009	0,510	1,25	0,007	0,408
0,321	0,2	40,984	1281,151	0,05	0,052	2,978	1,25	0,042	2,383
0,321	0,3	91,452	1281,151	0,05	0,452	25,874	1,25	0,361	20,699

0,321	0,4	160,722	1281,151	0,05	0,222	12,722	1,25	0,178	10,178
0,321	0,5	247,479	1281,151	0,05	0,135	7,729	1,25	0,108	6,183
0,321	0,6	350,131	1281,151	0,05	0,109	6,271	1,25	0,088	5,017
0,321	0,7	466,867	1281,151	0,05	0,097	5,558	1,25	0,078	4,447
0,321	0,8	595,712	1281,151	0,05	0,089	5,113	1,25	0,071	4,091
0,321	0,9	734,588	1281,151	0,05	0,084	4,790	1,25	0,067	3,832
0,321	1	881,368	1281,151	0,05	0,079	4,531	1,25	0,063	3,625
0,321	1,1	1033,924	1281,151	0,05	0,075	4,307	1,25	0,060	3,446
0,321	1,2	1190,175	1281,151	0,05	0,072	4,105	1,25	0,057	3,284
0,321	1,3	1348,121	1281,151	0,05	0,068	3,918	1,25	0,055	3,134
0,321	1,4	1505,885	1281,151	0,05	0,065	3,740	1,25	0,052	2,992
0,321	1,5	1661,737	1281,151	0,05	0,062	3,570	1,25	0,050	2,856
0,321	1,6	1814,125	1281,151	0,05	0,059	3,406	1,25	0,048	2,725
0,321	1,7	1961,689	1281,151	0,05	0,057	3,247	1,25	0,045	2,597
0,321	1,8	2103,274	1281,151	0,05	0,054	3,093	1,25	0,043	2,474
0,321	1,9	2237,940	1281,151	0,05	0,051	2,944	1,25	0,041	2,355
0,321	2	2364,957	1281,151	0,05	0,049	2,799	1,25	0,039	2,239

Respon WEC ukuran D=4m H=5,5m t=30mm kedalaman 10m

Wn	w	Mmax	K	Cf	Respon (rad)	degree	A (m)	RAO (rad/m)	RAO (degree/m)
0,639	0,1	10,318	2087,256	0,05	0,005	0,290	1,25	0,004	0,232
0,639	0,2	41,039	2087,256	0,05	0,022	1,248	1,25	0,017	0,998
0,639	0,3	91,476	2087,256	0,05	0,056	3,215	1,25	0,045	2,572
0,639	0,4	160,515	2087,256	0,05	0,126	7,207	1,25	0,101	5,766
0,639	0,5	246,656	2087,256	0,05	0,299	17,117	1,25	0,239	13,694
0,639	0,6	348,071	2087,256	0,05	1,104	63,246	1,25	0,883	50,597
0,639	0,7	462,670	2087,256	0,05	0,972	55,689	1,25	0,778	44,551
0,639	0,8	588,178	2087,256	0,05	0,485	27,788	1,25	0,388	22,230
0,639	0,9	722,211	2087,256	0,05	0,348	19,950	1,25	0,279	15,960
0,639	1	862,353	2087,256	0,05	0,283	16,242	1,25	0,227	12,993
0,639	1,1	1006,233	2087,256	0,05	0,245	14,015	1,25	0,196	11,212
0,639	1,2	1151,586	2087,256	0,05	0,218	12,477	1,25	0,174	9,982
0,639	1,3	1296,316	2087,256	0,05	0,197	11,313	1,25	0,158	9,050
0,639	1,4	1438,536	2087,256	0,05	0,181	10,374	1,25	0,145	8,299
0,639	1,5	1576,607	2087,256	0,05	0,167	9,582	1,25	0,134	7,666
0,639	1,6	1709,154	2087,256	0,05	0,155	8,893	1,25	0,124	7,115
0,639	1,7	1835,081	2087,256	0,05	0,145	8,280	1,25	0,116	6,624
0,639	1,8	1953,562	2087,256	0,05	0,135	7,726	1,25	0,108	6,181
0,639	1,9	2064,035	2087,256	0,05	0,126	7,221	1,25	0,101	5,777
0,639	2	2166,181	2087,256	0,05	0,118	6,756	1,25	0,094	5,405

Respon WEC ukuran D=4m H=5,5m t=30mm kedalaman 15m

Wn	w	Mmax	K	Cf	Respon (rad)	degree	A (m)	RAO (rad/m)	RAO (degree/m)
0,505	0,1	16,821	3363,480	0,05	0,005	0,298	1,25	0,004	0,239
0,505	0,2	66,888	3363,480	0,05	0,024	1,350	1,25	0,019	1,080
0,505	0,3	149,030	3363,480	0,05	0,068	3,907	1,25	0,055	3,125
0,505	0,4	261,346	3363,480	0,05	0,204	11,687	1,25	0,163	9,349
0,505	0,5	401,287	3363,480	0,05	1,182	67,713	1,25	0,945	54,170
0,505	0,6	565,755	3363,480	0,05	0,393	22,495	1,25	0,314	17,996
0,505	0,7	751,222	3363,480	0,05	0,240	13,734	1,25	0,192	10,988
0,505	0,8	953,859	3363,480	0,05	0,187	10,705	1,25	0,149	8,564
0,505	0,9	1169,675	3363,480	0,05	0,159	9,126	1,25	0,127	7,300
0,505	1	1394,644	3363,480	0,05	0,142	8,114	1,25	0,113	6,491
0,505	1,1	1624,833	3363,480	0,05	0,129	7,379	1,25	0,103	5,903
0,505	1,2	1856,512	3363,480	0,05	0,119	6,797	1,25	0,095	5,438
0,505	1,3	2086,243	3363,480	0,05	0,110	6,309	1,25	0,088	5,048
0,505	1,4	2310,963	3363,480	0,05	0,103	5,883	1,25	0,082	4,707
0,505	1,5	2528,030	3363,480	0,05	0,096	5,501	1,25	0,077	4,401
0,505	1,6	2735,258	3363,480	0,05	0,090	5,152	1,25	0,072	4,122
0,505	1,7	2930,927	3363,480	0,05	0,084	4,830	1,25	0,067	3,864
0,505	1,8	3113,781	3363,480	0,05	0,079	4,530	1,25	0,063	3,624
0,505	1,9	3283,002	3363,480	0,05	0,074	4,249	1,25	0,059	3,399
0,505	2	3438,174	3363,480	0,05	0,070	3,987	1,25	0,056	3,190

Respon WEC ukuran D=4m H=5,5m t=30mm kedalaman 20m

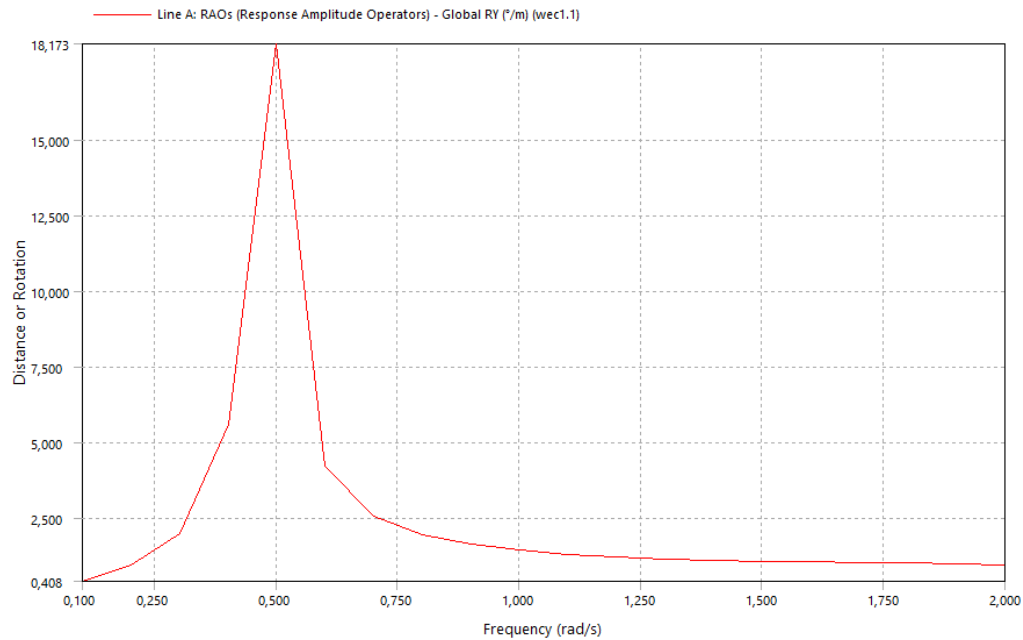
Wn	w	Mmax	K	Cf	Respon (rad)	degree	A (m)	RAO (rad/m)	RAO (degree/m)
0,424	0,1	23,369	4536,613	0,05	0,005	0,312	1,25	0,004	0,250
0,424	0,2	92,908	4536,613	0,05	0,026	1,506	1,25	0,021	1,205
0,424	0,3	206,939	4536,613	0,05	0,090	5,182	1,25	0,072	4,146
0,424	0,4	362,744	4536,613	0,05	0,552	31,631	1,25	0,442	25,305
0,424	0,5	556,692	4536,613	0,05	0,301	17,224	1,25	0,240	13,779
0,424	0,6	784,382	4536,613	0,05	0,171	9,782	1,25	0,137	7,826
0,424	0,7	1040,828	4536,613	0,05	0,132	7,582	1,25	0,106	6,065
0,424	0,8	1320,639	4536,613	0,05	0,113	6,497	1,25	0,091	5,197
0,424	0,9	1618,217	4536,613	0,05	0,102	5,818	1,25	0,081	4,655
0,424	1	1927,938	4536,613	0,05	0,093	5,329	1,25	0,074	4,263
0,424	1,1	2244,323	4536,613	0,05	0,086	4,940	1,25	0,069	3,952
0,424	1,2	2562,191	4536,613	0,05	0,080	4,612	1,25	0,064	3,689
0,424	1,3	2876,785	4536,613	0,05	0,075	4,322	1,25	0,060	3,457
0,424	1,4	3183,872	4536,613	0,05	0,071	4,058	1,25	0,057	3,246
0,424	1,5	3479,818	4536,613	0,05	0,067	3,814	1,25	0,053	3,051
0,424	1,6	3761,627	4536,613	0,05	0,063	3,586	1,25	0,050	2,869
0,424	1,7	4026,962	4536,613	0,05	0,059	3,372	1,25	0,047	2,698
0,424	1,8	4274,130	4536,613	0,05	0,055	3,170	1,25	0,044	2,536

0,424	1,9	4502,054	4536,613	0,05	0,052	2,979	1,25	0,042	2,383
0,424	2	4710,223	4536,613	0,05	0,049	2,798	1,25	0,039	2,239

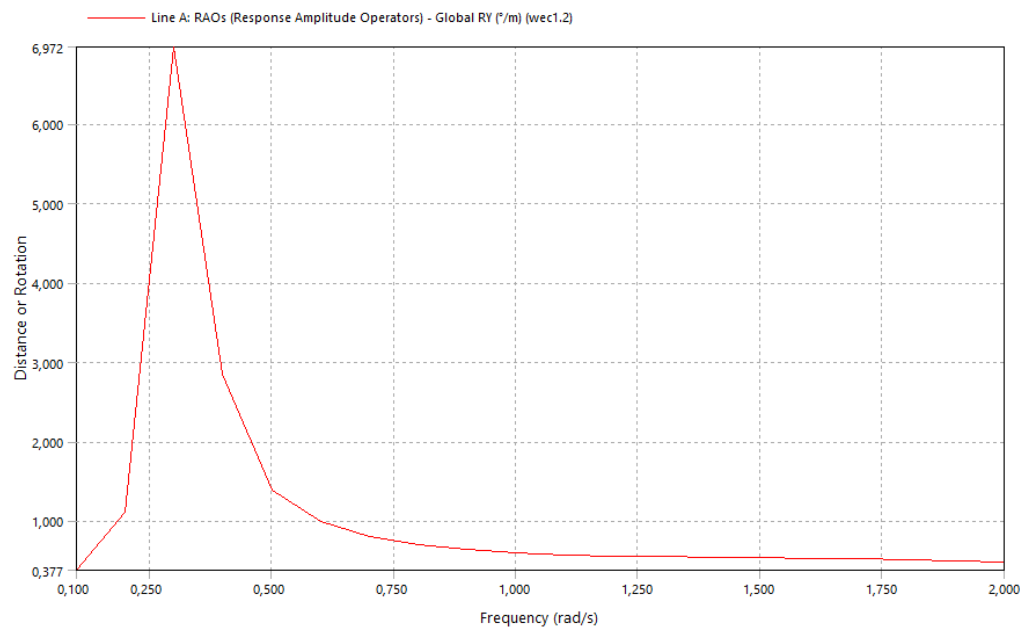
LAMPIRAN D

HASIL RUNNING ANSYS AQWA

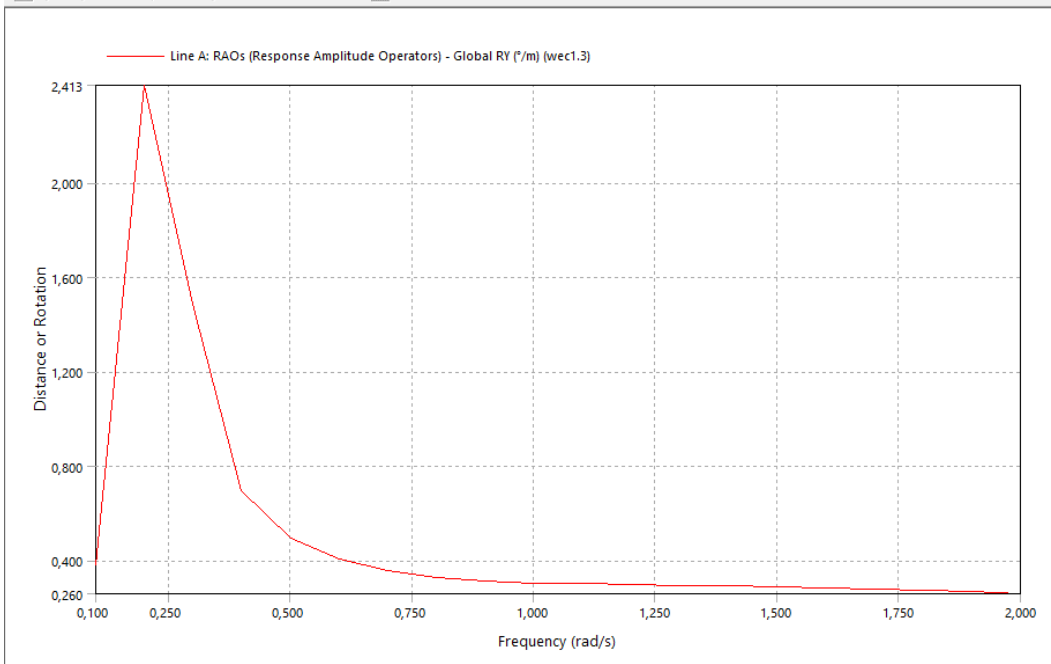
Variasi D=2m H=3,5m t=10mm d=10m



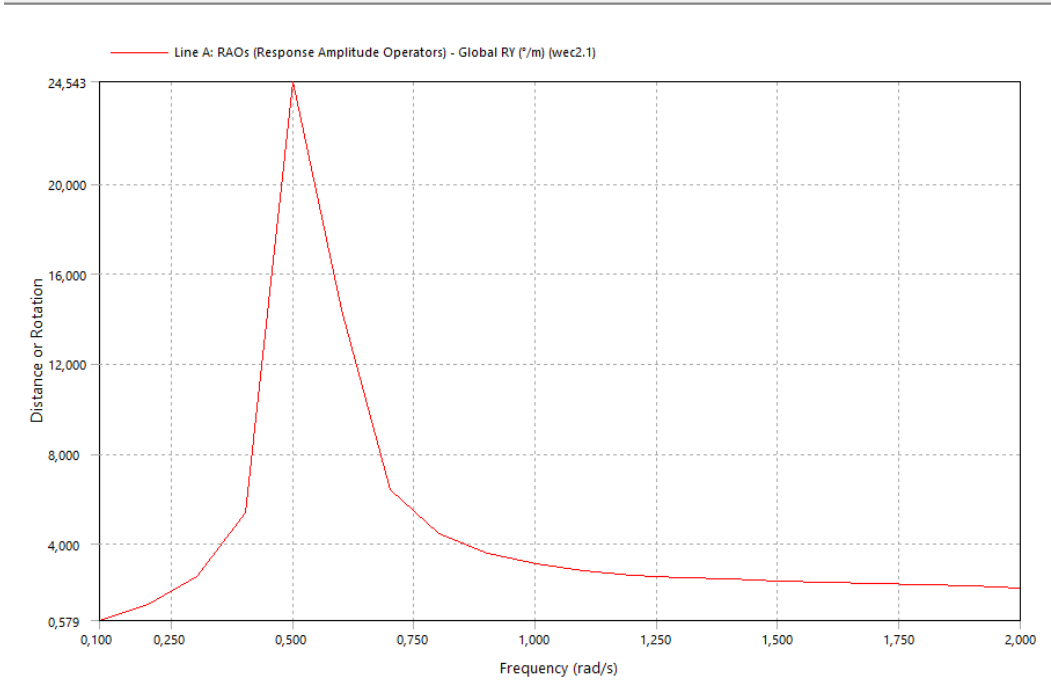
Variasi D=2m H=3,5m t=10mm d=15m



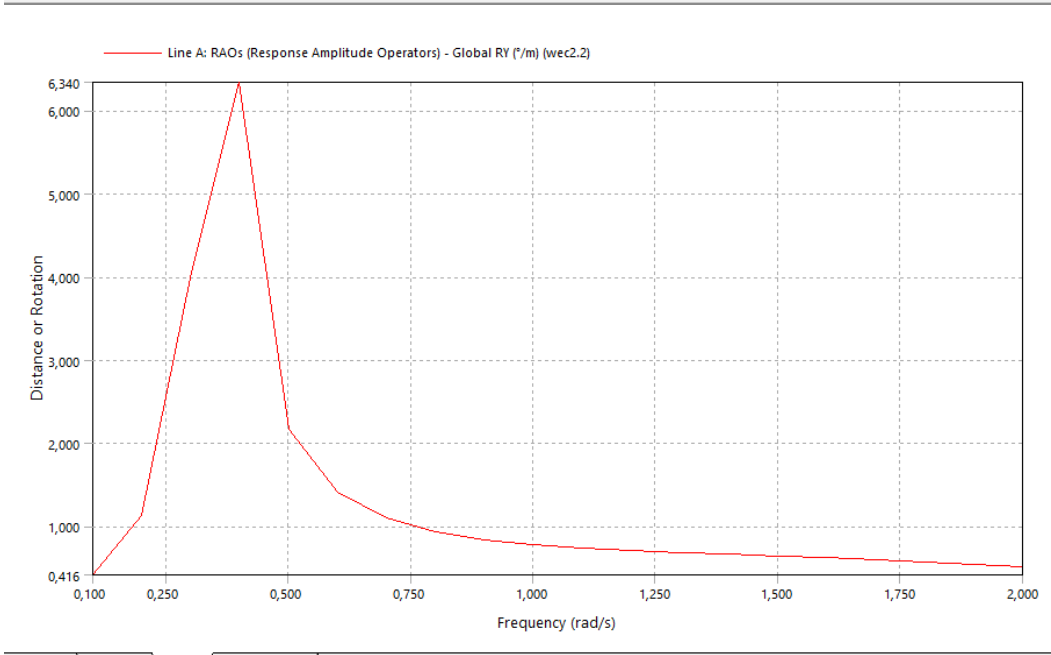
Variasi D=2m H=3,5m t=10mm d=20m



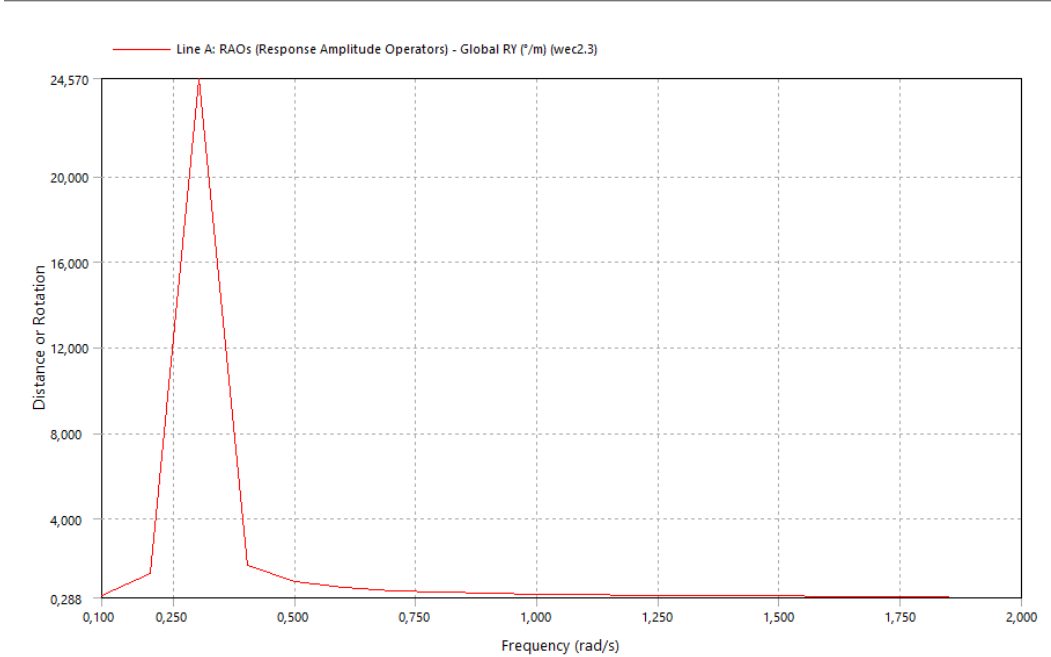
Variasi D=3m H=4,5m t=25mm d=10m



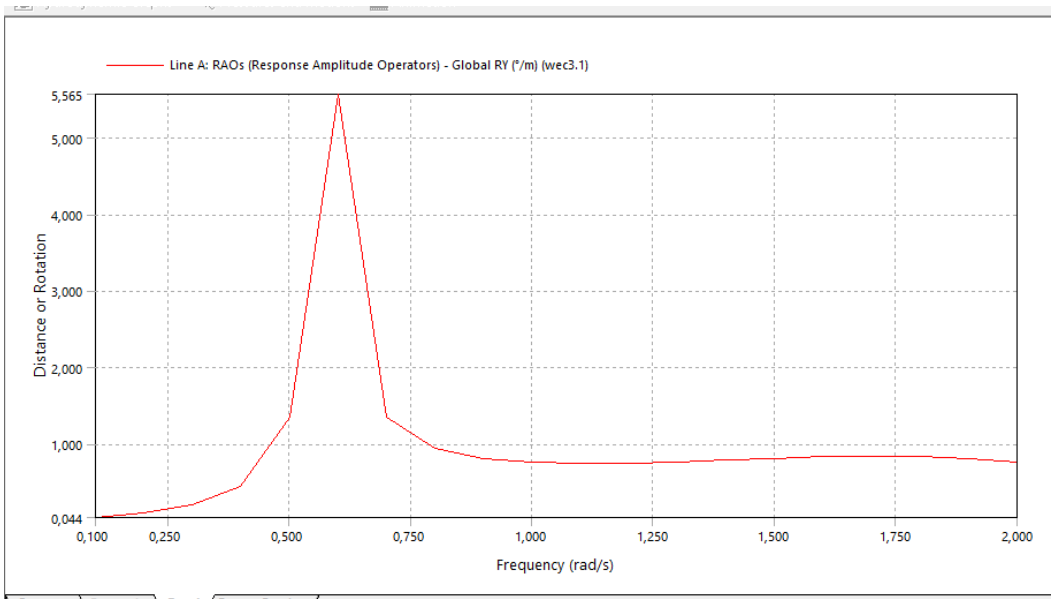
Variasi D=3m H=4,5m t=25mm d=15m



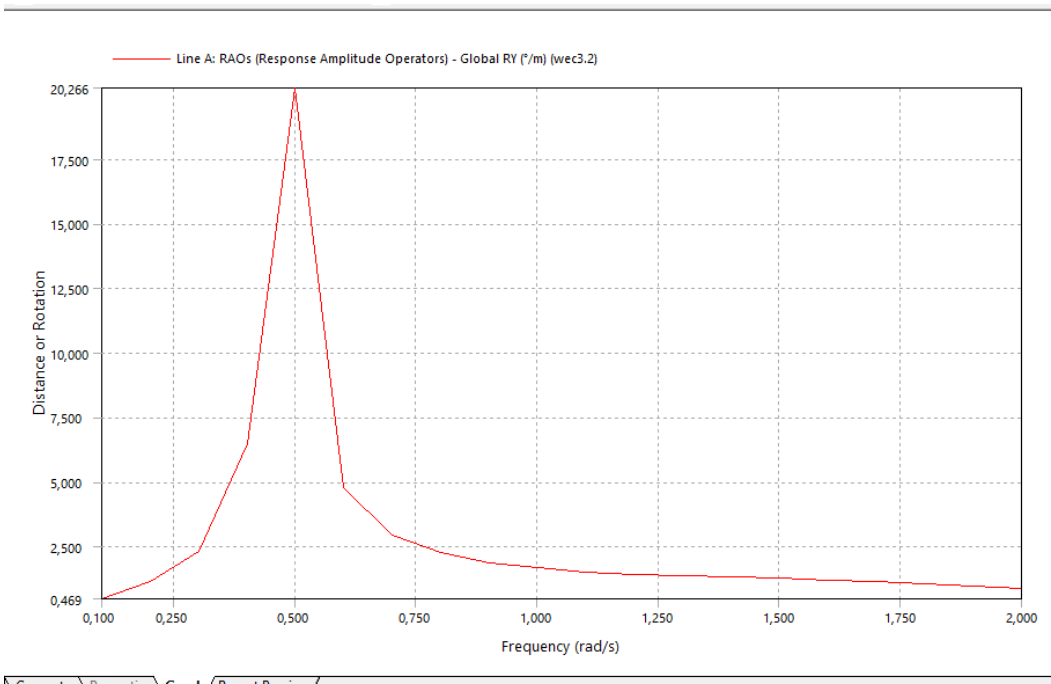
Variasi D=3m H=4,5m t=25mm d=20m



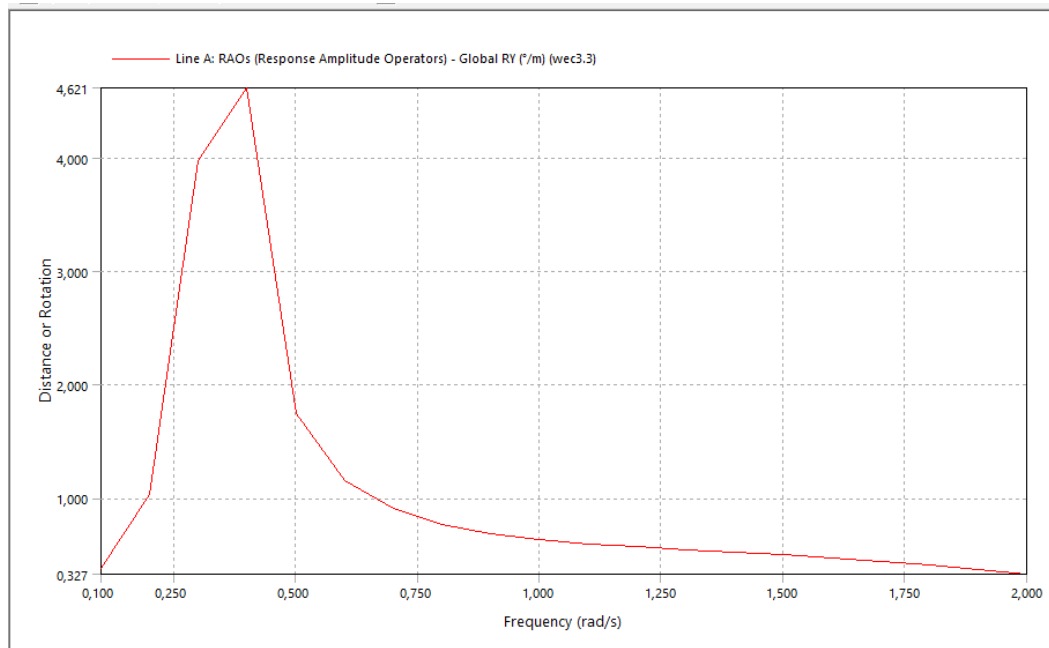
Variasi D=4m H=5,5m t=30mm d=10m



Variasi D=4m H=5,5m t=30mm d=15m



Variasi D=4m H=5,5m t=30mm d=20m



BIODATA PENULIS



Danil Tri Putra merupakan putra ketiga dari empat bersaudara. Penulis dilahirkan di Palembang, 24 April 1995. Penulis merupakan anak kandung dari Ibu Fajar Sempurna dan Bapak Udni Usman. Penulis menempuh pendidikan sekolah dasar di SD N 43 Palembang. Lalu, dilanjutkan di SMP N 19 Palembang. Sebelum masuk ke ITS penulis bersekolah di SMA Plus N 17 Palembang. Setelah lulus SMA penulis melanjutkan masuk Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan melalui jalur SBMPTN. Selama berkuliah di ITS penulis aktif dalam mengikuti kegiatan kampus mulai dari kegiatan jurusan, fakultas maupun ITS. Pada kegiatan jurusan penulis pernah menjadi staff departemen hubungan luar di Himpunan Mahasiswa Teknik kelautan. Untuk kegiatan fakultas penulis pernah menjadi kepala departemen kajian strategis BEM FTK ITS. Untuk kegiatan institut penulis pernah menjadi staff kajian strategis BEM ITS, Kepanitiaan YESSUMMIT, dan kepanitiaan GERIGI ITS. Penulis juga pernah mendapatkan pengalaman kerja praktek di PT ZEE Indonesia pada tahun 2016.

Kontak Penulis :

Email : daniltriputra@yahoo.com

Telepon : 085267417242